

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Antonio Satinović

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc.dr.sc. Ivica Garašić

Student:

Antonio Satinović

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru Doc.dr.sc. Ivici Garašiću na nesebičnoj pomoći, na pomoći oko literature i savjetima prilikom izrade ovog rada,

Također se zahvaljujem asistentu dipl.ing. stroj. Matiji Bušiću na velikoj pomoći i savjetima prilikom izrade eksperimentalnog dijela rada.

Želio bi se zahvaliti i tehničkom suradniku Krešimiru Sukobljeviću na pomoći oko eksperimentalnog dijela rada, te kolegi Denisu Matiji na doniranom aluminijskom okviru bicikla.

Zahvaljujem svojim roditeljima na strpljenju i potpori koju su mi pružili tijekom studiranja preddiplomskog studija.

Antonio Satinović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
 Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
 proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
 materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **ANTONIO SATINOVIĆ** Mat. br.: **0035181948**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ANALIZA PUCANJA ZAVARENIH SPOJEVA ALUMINIJSKIH OKVIRA ZA BICIKLE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **ANALYSIS OF WELD FAILURE ON ALUMINIUM BICYCLE FRAME**

Opis zadatka:

Proučiti primjenu aluminijskih legura za izradu okvira za bicikle kao i moguće opcije zavarivanja u proizvodnji. Izdvojiti specifične probleme zavarljivosti pojedinih legura posebno sa stanovišta pojave oslabljenja zavarenog spoja i pojave pukotina. Analizirati zavareni aluminijski okvir za bicikle i procijeniti adekvatnost tehnologije. Dati primjere pucanja zavarenih spojeva i odrediti kritične spojeve.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je za aluminijski okvir bicikla provesti ispitivanje površinskih pukotina te detektirati mjesto loma. Na temelju spoznaja propisati tehnologiju zavarivanja (uklanjanje pukotine, priprema zavora, postupak, zavarivanja, parametri, dodatni materijali, naknadna obrada zavora) i načiniti reparaturu. Nakon zavarivanja adekvatno ispitati zavareni spoj i donijeti zaključke o kvaliteti i pouzdanosti tehnologije zavarivanja.

Zadatak zadan:
 25. studenog 2014.

Rok predaje rada:
 1. rok: 26. veljače 2015.
 2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:
 1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.
 2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	VII
POPIS TABLICA.....	VIII
POPIS OZNAKA.....	IX
SAŽETAK.....	X
SUMMARY	XI
1. UVOD	1
1.1. Povijest aluminija	1
1.2. Upotreba i karakteristike aluminija	2
2. PODJELA I OZNAČAVANJE ALUMINIJSKIH LEGURA	4
2.1. Označavanje aluminijskih legura	4
2.1.1. Označavanje gnječenih aluminijskih legura	5
2.1.2. Označavanje lijevanih aluminijskih legura.....	5
2.2. Oznake metalurških stanja legura za gnječenje	7
3. ZAVARIVANJE ALUMINIJA.....	8
3.1. Zavarivački postupci koji se koriste pri zavarivanju aluminija.....	8
3.2. TIG postupak zavarivanja	8
3.3. MIG postupak zavarivanja	9
3.4. Zaštitni plinovi za zavarivanje aluminija	10
3.5. Odabir dodatnog materijala	11
3.6. Problemi zavarljivosti aluminija	13
3.6.1. Poroznost.....	13
3.6.2. Uklanjanje oksidnog sloja tijekom zavarivanja.....	14
3.6.3. Tople pukotine.....	15
3.6.4. Gubitak čvrstoće uslijed zavarivanja	18
4. NERAZORNE METODE ISPITIVANJA ZAVARA	20
4.1. Ispitivanje penetrantima	20
4.2. Ispitivanje vrtložnim strujama.....	22
4.3. Ispitivanje ultrazvukom	22
4.4. Radiografsko ispitivanje (RT)	24
5. ALUMINIJSKE LEGURE U BIKIKLISTIČKOJ INDUSTRIJI.....	26
5.1. Upotreba aluminija za okvire bicikala	26

5.2. Tipičan dizajn i izgled okvira za bicikle	28
5.3. Naprezanja koja opterećuju okvir bicikla	30
5.4. Dvije glavne aluminijske legure u biciklističkoj industriji	31
5.5. Zavarljivost legura serije 6000.....	31
5.5.1. Legura EN AW-6061	32
5.6. Zavarljivost legura serije 7000.....	33
5.6.1. Legura EN AW-7005	33
6. EKSPERIMENTALNI DIO	34
6.1. Opis eksperimenta.....	34
6.2. Ispitivanje vrste materijala okvira	35
6.3. Ispitivanje zvara penetrantima prije zavarivanja.....	38
6.4. Reparatura pukotine	41
6.5. Ispitivanje zvara penetrantima nakon zavarivanja	44
7. ZAKLJUČAK.....	47
LITERATURA.....	48

POPIS SLIKA

Slika 1. Shema TIG postupka zavarivanja [1]	8
Slika 2. Shema MIG postupka zavarivanja [1]	9
Slika 3. Fino raspršena poroznost u čeonom spoju aluminija debljine 6mm (TIG) [1]	13
Slika 4. Oksidni sloj "zarobljen" unutar zavara [1]	14
Slika 5. Efekt polariteta na katodno čišćenje i balans topline kod MIG i TIG zavarivanja [1]	15
Slika 6. Tople pukotine: (a) U završetku TIG zavara u leguri A5083; (b) u sučeonom spoju 3mm debelih ploča legure A6082 sa dodatnim materijalom 4043, TIG postupak [1]	17
Slika 7. Utjecaj zavarivanja na leguri 6061 T6 dozrijevanjem očvršnutoj leguri [1]	19
Slika 8. Shema postupka ispitivanja penetrantima [1]	21
Slika 9. Izgled rezultata testa nakon ispitivanja penetrantom [1]	21
Slika 10. Shema ultrazvučnog testiranja metala [1]	23
Slika 11. Poroznost u sučeonom zavaru legure serije 4000 zavarene TIG postupkom [1]	25
Slika 12. Prikaz pukotine na vlastitom okviru bicikla (spoj donje i prednje cijevi)	27
Slika 13. Izgled okvira "dupli trokut" te nazivi njegovih dijelova [14]	28
Slika 14. Izgled "tvrdorepog" (HT) okvira bicikla [21]	29
Slika 15. Izgled okvira za bicikl s dvostrukim ovjesom (FS) [22]	29
Slika 16. Mehanička opterećenja na okvir bicikla [23]	30
Slika 17. Donirani okvir bicikla (prednji trokut)	34
Slika 18. Pukotina na rubu zavara	35
Slika 19. Priprema površine za kvantitativnu kemijsku analizu aluminijske legure iz koje je okvir izrađen	36
Slika 20. Određivanje masenog udjela kemijskih elemenata ručnim uređajem Olympus XRF	37
Slika 21. Mehanički očišćen zavar prije ispitivanja penetrantima	38
Slika 22. Oprema za ispitivanje penetrantom	39
Slika 23. Penetrant nanesen na površinu zavara	39
Slika 24. Zavar nakon što je vodom ispran penetrant	40
Slika 25. Indikacija pukotine	40
Slika 26. Aparat za zavarivanje KJELLBERG TINY 170 AC/DC	41
Slika 27. Zavarivač tijekom zavarivanja	42
Slika 28. Svojstva i kemijski sastav šipke dodatnog materijala ER 5356 [28]	43
Slika 29. Izgled zavara nakon reparature (pogled s lijeva)	44
Slika 30. Izgled zavara nakon reparature (pogled s desna)	44
Slika 31. Nanošenje penetranta na zavar nakon reparature	45
Slika 32. Indikacija pukotine nakon nanošenja razvijača	45
Slika 33. Indikacija pukotine u završnom krateru reparaturnog zavara	46

POPIS TABLICA

Tablica 1. Mehanička svojstva aluminija [3] [4]	3
Tablica 2. Numeričke oznake legura aluminija [5].....	6
Tablica 3. Klasifikacija inertnih plinova za zavarivanje aluminija [10]	10
Tablica 4. Odabir dodatnog materijala za postizanje specifičnih svojstava kod uobičajenih legura (prema normi AWS A5.10/A5.10M:1999) [1].....	11
Tablica 5. Opozivi okvira za bicikle između 2002. godine i 2011. godine.[]	26
Tablica 6. Karakteristike legure EN AW-6061 T6 [26].....	32
Tablica 7. Karakteristike legure EN AW-7005 T6 [27].....	33
Tablica 8. Izmjereni maseni udjeli kemijskih elemenata okvira	37
Tablica 9. Parametri zavarivanja.....	41

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ρ	kg/m^3	gustoća
θ_s	$^{\circ}\text{C}$	solidus temperatura
θ_L	$^{\circ}\text{C}$	likvidus temperatura
E	N/mm^2	modul elastičnosti
G	N/mm^2	modul smicanja
ν	-	poissonov omjer
c_p	J/kgK	specifični toplinski kapacitet
EC	%IACS	električna vodljivost
λ	W/mK	toplinska vodljivost
ρ_{el}	$\text{n}\Omega\text{m}$	električna otpornost
α	$\mu\text{m/mK}$	koeficijent toplinske rastezljivosti
$R_{p0,2}$	N/mm^2	granica razvlačenja
R_m	N/mm^2	vlačna čvrstoća
τ	N/mm^2	smična čvrstoća
H	-	tvrdoća
HB	-	tvrdoća po Brinellu
$A5$	%	elongacija

SAŽETAK

Danas su na tržištu dostupne različite aluminijske legure. Većina biciklističkih tvrtki profile cijevi daje izraditi prema vlastitim specifikacijama. Odgovarajuće dizajnirani aluminijski okviri nude važne prednosti: malu težinu, visoku otpornost koroziji i nisku cijenu. Također su jednostavni za proizvodnju, budući da se cijevi mogu izvlačiti, savijati, i oblikovati u gotovo svaki oblik. Međutim, glavni problemi kod aluminijskih okvira proizlaze iz pada čvrstoće legura nakon zavarivanja, te kraći vijek trajanja aluminijske konstrukcije uslijed dinamičkog opterećenja u usporedbi s ostalim materijalima koji se koriste u proizvodnji okvira za bicikle. U prvom dijelu rada navedena je podjela aluminijskih legura, postupci zavarivanja koji se najčešće koriste za njihovo zavarivanje, problemi koji se javljaju pri zavarivanju i nerazorne metode kojima se zavari ispituju, te ukratko o tipičnom dizajnu okvira bicikla, te legurama koje se koriste za izradu i njihova mehanička svojstva. Drugi dio rada temelji se na ispitivanju pukotine i reparaturi zavarenog spoja na aluminijskom okviru izrađenom od legure EN AW-7005, koja je jedna od najčešćih legura koje se koriste u biciklističkoj industriji. Eksperiment se sastoji od ispitivanja napuklog zavarivanja metodom penetranta. reparature pukotine TIG postupkom zavarivanja, te naknadnog ispitivanja penetranta kako bi se utvrdilo da je reparatura kvalitetno izvršena. Na temelju tog eksperimenta donesen je zaključak o isplativosti i mogućnostima reparature aluminijskog okvira bicikla.

Ključne riječi: aluminij, aluminijske legure, zavarivanje, okvir bicikla, pucanje zavarivanja

SUMMARY

Today on the market we have a range of many different aluminium alloys. Most bicycle companies make tubes for the frame by their own specifications. Adequately designed aluminium frames give essential advantages: low weight, high resistance to corrosion and low price. Also, they are simple to manufacture, because tubes can be drawn, bent, and shaped in almost any form. However, main problems with aluminium frames come from their strength loss due to welding, and in comparison with other frame materials, aluminium is more susceptible to fatigue failure at lower cycle counts and has a finite fatigue life. In the first part of the work are presented aluminium alloys and their division into series, welding procedures that are generally used for welding of aluminium and its alloys, weldability problems and non-destructive methods of testing, as well as shortly described typical bicycle frame design, and alloys that are used in its manufacturing. Second part of work is based on the examination of the crack and repair welding of joint on the aluminium bicycle frame made out of the EN AW-7005 alloy, which is one of the most common alloys used in bicycle industry. The experiment was composed of non destructive testing of the weld using penetrant method, repairing the crack using TIG procedure, and afterwards testing the repair weld again using the penetrant method to establish that the repair was performed correctly. After the experiment was done, the conclusion was made about possibility and profitability when repairing the damaged aluminium frame.

Key words: aluminium, aluminium alloys, welding, bicycle frame, weld failure

1. UVOD

1.1. Povijest aluminija

Aluminij je otkriven 1825. godine, no tek 1886. godine počela je održiva industrijska proizvodnja aluminija iz rude boksita. Proces dobivanja aluminija iz rude boksita provodi se u dvije faze: prva je odvajanje aluminijevog oksida, Al_2O_3 iz rude, zatim katalitičke redukcije Al_2O_3 na temperaturi između 950 i 1000 °C u kriolitu (mineral). Tako nastaje aluminij koji sadržava 5-10% nečistoća kao što su silicij (Si) i željezo (Fe), koje se eliminiraju daljnjim elektrolitičkim procesima ili tehnikom zonskog taljenja kako bi se dobila čistoća aluminija od barem 99.9%. Takav aluminij je relativno slab i rijetko se upotrebljava, pogotovo u konstrukcijske svrhe. Kako bi se povećala njegova mehanička čvrstoća, čisti aluminij se legira s metalima kao što su bakar (Cu), mangan (Mn), magnezij (Mg), silicij (Si) i cink (Zn). Jedna od prvih aluminijskih legura je bila aluminij - bakar. Oko 1910. godine otkriven je fenomen precipitacijskog očvrnuća u toj familiji legura, te su se mnoge od tih legura počele upotrebljavati u aeronautičkoj industriji. Od tada je razvijen velik broj legura s čvrstoćama koje mogu konkurirati ugljičnom čeliku dobre kvalitete, ali s trećinom težine. Veliki zamah razvoju aluminijskih legura zadali su dva svjetska rata, kada je aluminij postao vrlo važan metal u konstrukciji trupa i oplata aviona. U tom periodu velikom napretku aluminija pridonio je razvitak zavarivačkih tehnologija sa zaštitom inertnih plinova, MIG (elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog plina) i TIG (elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina). Te tehnologije omogućile su zavare visoke čvrstoće bez potrebe štetnih praškova za zavarivanje [1].

1.2. Upotreba i karakteristike aluminija

Aluminij ima vrlo široku upotrebu u modernom svijetu zahvaljujući njegovim neobičnim kombinacijama svojstava. Nijedan drugi metalni element ne može se upotrebljavati na toliko različitih načina u toliko različitih domena kao što su građevinarstvo, zrakoplovna industrija, brodogradnja, kemijska i prehrambena industrija, automobilistička industrija te elektrotehnika. Upotreba aluminija nije uvijek tako očita kao što se čini, jer značajne proporcije proizvedenog aluminija i aluminijevog oksida odlaze u procese kao što je, npr. proizvodnja stakla, prije nego u česte potrošačke proizvode koji se lako povezuju s aluminijem [2]. U tablici 1. navedene su vrijednosti mehaničkih svojstava aluminija.

Karakteristike aluminija:

- Niska gustoća - trostruko manja od gustoće čelika.
- Neotrovan metal - upotreba u prehrambenoj industriji.
- Aluminij u dodiru sa zrakom oksidira. Taj oksid je tanki film, vrlo izdržljiv i otporan, te samoobnavljajući. On daje aluminijским legurama izvrsnu korozijsku otpornost, odnosno omogućava im upotrebu bez dodatne zaštite od korozije. Tu zaštitu moguće je dodatno poboljšati anodiziranjem - formiranjem oksidnog filma kontrolirane debljine.
- Visoki koeficijent toplinskog rastezanja - može dovesti do neprihvatljivog izvijanja i deformacije tijekom zavarivanja.
- Vrlo dobra električna provodljivost.
- Vrlo dobra provodljivost topline.
- Ne mijenja boju povećanjem temperature, te je zavarivaču teže procijeniti kada će doći do taljenja.
- Nije magnetičan - kod elektrolučnog zavarivanja eliminirano je puhanje luka.
- Plošno centrirana kubična kristalna rešetka zbog čije strukture sniženjem temperature ne dolazi do smanjenja žilavosti, štoviše, kod nekih legura sniženjem temperature dolazi do povećanja u vlačnoj čvrstoći i duktilnosti. FCC rešetka također znači da je aluminij lako oblikovljiv, što omogućuje proizvodima da se proizvedu ekstrudiranjem, dubokim vučenjem te oblikovanjem visoke brzine energije (eksplozijom).
- Ne mijenja svoju kristalnu strukturu zagrijavanjem ili hlađenjem, kao npr. čelik koji prolazi kroz kristalne transformacije ili fazne promjene na određenim temperaturama. Zbog toga je moguće očvrnuti čelik brzim hlađenjem, dok promjene u brzini hlađenja imaju vrlo mali ili nikakav učinak na aluminijske legure. [1]

Tablica 1. Mehanička svojstva aluminija [3] [4]

Svojstvo, simbol	Vrijednost, mjerna jedinica	
Gustoća, ρ	2700 kg/m ³	
Solidus temperatura, θ	645 °C	
Likvidus temperatura, θ	658 °C	
Modul elastičnosti, E	69000 N/mm ²	
Modul smicanja, G	25900 N/mm ²	
Poissonov omjer, ν	0.33	
Specifični toplinski kapacitet, c_p	899 J/kgK	
Električna vodljivost, EC	59,5 %IACS	
Toplinska vodljivost, λ	229 W/mK	
Električna otpornost, ρ_{el}	29 nΩm	
Koeficijent toplinske rastezljivosti, α	23,5 μm/mK	
	Žareno stanje	Plastičnom deformacijom očvrsnuto stanje
Granica razvlačenja, $R_{p0,2}$	35 N/mm ²	170 N/mm ²
Vlačna čvrstoća, R_m	80 N/mm ²	180 N/mm ²
Smična čvrstoća, τ	50 N/mm ²	-
Tvrdoća, $HB\ 10/500$	21	48
Elongacija, A_5	42 %	-

2. PODJELA I OZNAČAVANJE ALUMINIJSKIH LEGURA

Legure aluminija podijeljene su u 9 serija. Dostupne su u lijevanim i kovanim oblicima. Kovani oblici mogu biti toplo i hladno valjane ploče, šipke, žice i folije. Zbog duktilnosti i obradljivosti aluminija, ekstruzija je jednostavna metoda za proizvodnju kompleksnih oblika, pogotovo za duge dijelove, poput I i H nosača, kuteva, kanala, T-dijelova, cijevi i slično. Toplo i hladno kovanje brza je i ekonomična metoda za izradu jednostavnih oblika. Precizno kovanje je pogotovo prikladno za aluminijeve legure zbog dobre završne obrade površine, uskih tolerancija, te eliminacije naknadne strojne obrade. [1]

2.1. Označavanje aluminijskih legura

Aluminijske legure označavaju se numerički ili kemijskim simbolima. U tablici 2. prikazane su numeričke oznake aluminijskih legura. Prvi broj numeričke oznake označava glavni legirni element, tj. seriju kojoj legura pripada, druga znamenka pokazuje modifikaciju legure, a zadnje dvije znamenke kod čistog aluminija označavaju decimalni postotak aluminija (npr. 1060 označava leguru 99,6% Al). U slučaju numeričkih oznaka legura za lijevanje, zadnja znamenka označava proizvodni oblik, 1 ili 2 se odnosi na ingot (ovisno o čistoći), a 0 je oznaka za lijevanje. Za definiranje osnovnih metalurških stanja aluminija i njegovih legura namijenjenih gnječenju, primjenjuje se standard EN 515. Ovim standardom metalurško stanje legura označava se slovnim simbolima iza kojih slijedi brojčana oznaka do tri znamenke, što ovisi o vrsti legure aluminija [5].

2.1.1. Označavanje gnječenih aluminijskih legura

Gnječeni aluminij i aluminijske legure su primarno namijenjene za proizvodnju toplim i hladnim oblikovanjem deformiranjem, kao npr. valjanjem, ekstrudiranjem, kovanjem i vučenjem. Prema europskoj normi EN 573 [6] gnječene legure se označavaju:

- EN - označava europski standard (normu)
- A - označava aluminij
- W - označava da se radi o gnječevoj leguri (engl. wrought)
- sastav legure koji je određen ili:
 - a) znamenkama (4 znamenke)
 - b) kemijskim simbolima iza kojih slijedi slovo i/ili znamenka koji označavaju metalurško stanje

Primjer: a) EN AW-5754-O

b) EN AW-Al-Mg3-O [7].

2.1.2. Označavanje lijevanih aluminijskih legura

Prema europskoj normi EN 1780 gnječene legure se označavaju:

- EN - označava europski standard (normu)
- A - označava aluminij
- C - označava da se radi o odljevku (engl. casting) iza kojeg slijedi crtica
- sastav legure koji je određen ili:
 - a) znamenkama (5 znamenaka)
 - b) kemijskim simbolima iza kojih slijedi slovo i/ili znamenka koji označavaju metalurško stanje

Primjer: EN AC-42000KT6

(legura Al 7%SiMg za lijevanje u višekratnom kalupu, T6 toplinska obrada)

Prvo slovo iza peteroznamenastog broja označava postupak lijevanja:

- D - Tlačni lijev
- K - kokilni lijev
- L - isparljivi lijev
- S - pješčani lijev [7].

Tablica 2. Numeričke oznake legura aluminija [5]

Legure za gnječenje		
1xxx	komercijalno čist Al (>99% Al)	ne očvršćavaju starenjem
2xxx	Al-Cu i Al-Cu-Li	očvršćavaju starenjem
3xxx	Al-Mn	ne očvršćavaju starenjem
4xxx	Al-Si i Al-Mg-Si	očvršćavaju starenjem u slučaju prisutnog Mg
5xxx	Al-Mg	ne očvršćavaju starenjem
6xxx	Al-Mg-Si	očvršćavaju starenjem
7xxx	Al-Mg-Zn	očvršćavaju starenjem
8xxx	Al-Li, Sn, Zr ili B	očvršćavaju starenjem
9xxx	još nisu u upotrebi	
Legure za lijevanje		
1xx.x.	komercijalno čist Al (>99% Al)	ne očvršćavaju starenjem
2 xx.x.	Al-Cu	očvršćavaju starenjem
3 xx.x.	Al-Si-Cu ili Al-Mg-Si	Neke legure ove serije su pogodne za očvršćavanje starenjem
4 xx.x.	Al-Si	ne očvršćavaju starenjem
5 xx.x.	Al-Mg	ne očvršćavaju starenjem
7 xx.x.	Al-Mg-Zn	očvršćavaju starenjem
8 xx.x.	Al-Sn	očvršćavaju starenjem
9 xx.x.	još nisu u upotrebi	

2.2. Oznake metalurških stanja legura za gnječenje

Mehanička svojstva legura osim o njihovom kemijskom sastavu ovise i o njihovom metalurškom stanju, npr, žareno, hladno kovano, toplinski obrađeno. Važno je da se metalurško stanje legure jasno i nedvosmisleno identificira od strane inženjera zavarivanja i konstruktora. Kako bi se to ostvarilo, CEN (Europski odbor za standardizaciju) je razvio sustav sufiksa koji identificiraju kroz koju količinu oblikovanja deformiranjem ili u kojem se stanju toplinske obrade legura nalazi [1]. Postoji 5 osnovnih oznaka identificiranih slovom prema normi EN 515, iza kojih može biti jedno ili više brojeva koji označuju precizno stanje. Metalurška stanja legura za gnječenje definiraju se sljedećim slovnim simbolima:

- F - označava sirovo stanje nakon prerade (engl. as fabricated). Primjenjuje se na proizvode dobivene plastičnom deformacijom bez da su postupci toplinske ili mehaničke obrade izvođeni pod posebnim nadzorom. Granične vrijednosti mehaničkih osobina ovakvih legura nisu precizno određene.
- O - označava žareno stanje legura (engl. annealed). To je stanje najveće oblikovljivosti koje može biti postignuto zadržavanjem legure na umjerenoj temperaturi određeno vrijeme.
- H - označava stanje materijala očvrtnuto hladnom plastičnom deformacijom i djelomično omekšano (engl. strain hardened). Primjenjuje se za legure očvrtnute plastičnom deformacijom, s naknadnim zadržavanjem ili bez naknadnog zadržavanja, na temperaturi koja izaziva djelomično omekšavanje metala. stanja H primjenjuju se za toplinski neočvrstljive legure aluminija tj. za legure serija 1000, 3000 i 5000. Iza ove oznake slijede uvijek najmanje dva broja. Prvi označava vrstu toplinske obrade, a drugi stupanj hladnog otvrdnjavanja.
- W - označava toplinski obrađeno labilno stanje. To je metalurški nestabilno stanje, koje se primjenjuje samo za legure koje nakon rastopnog žarenja spontano otvrdnjavaju pri sobnoj temperaturi. Ova oznaka je precizna (važuća) samo onda kada joj je pridruženo i vrijeme koje prođe od rastopnog žarenja do temperature na kojoj je proizvod zadržan, npr. vrijeme 60 minuta do 15 °C (W/60 min/15 °C). Iza oznake W obično nema nikakvih brojčanih simbola.
- T - ova oznaka vrijedi za proizvode koji stabilno stanje postižu toplinskom obradom, sa ili bez hladnog očvršćivanja. Označava toplinski očvrtnuto stanje postignuto toplinskom obradom za postizanje stanja drugačijih od F, O ili H. To znači da se ovo stanje primjenjuje isključivo za toplinski očvrstljive legure aluminija, tj. za legure serije 2000, 6000, 7000. Iza oznake T uvijek stoji jedan ili više brojeva koji označavaju specifični redoslijed različitih postupaka.

Brojevi koji slijede iza slova, označavaju iznos očvršćivanja pod naprezanjem, točan tip toplinske obrade, ili druge specijalne aspekte proizvodnje legure [5].

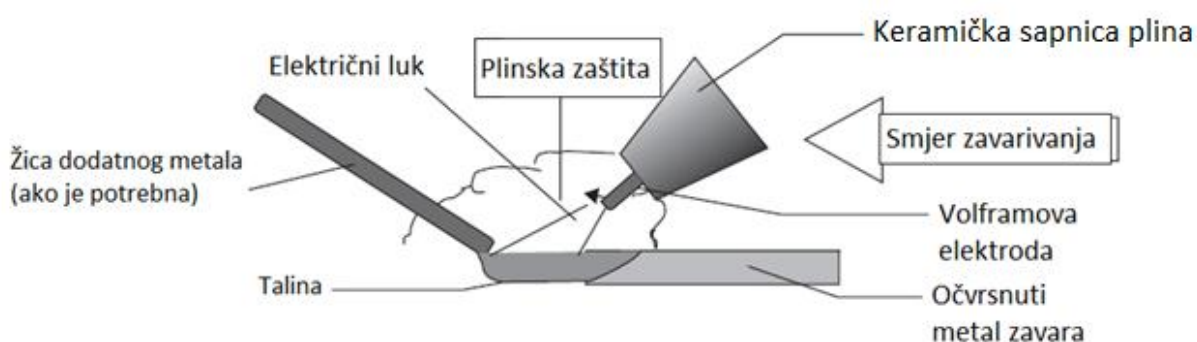
3. ZAVARIVANJE ALUMINIJA

3.1. Zavarivački postupci koji se koriste pri zavarivanju aluminija

Aluminij i aluminijske legure mogu se spajati zavarivanjem, praktički svim postupcima zavarivanja. Mogu se i lemiti pod određenim uvjetima. Zavarljivost znatno ovisi o sadržaju legiranih elemenata i stanju legure. Od postupaka zavarivanja najpovoljniji su i najviše se koriste TIG i MIG postupci za zavarivanje svih vrsta aluminija i njegovih legura, stoga će oni biti pobliže opisani [8].

3.2. TIG postupak zavarivanja

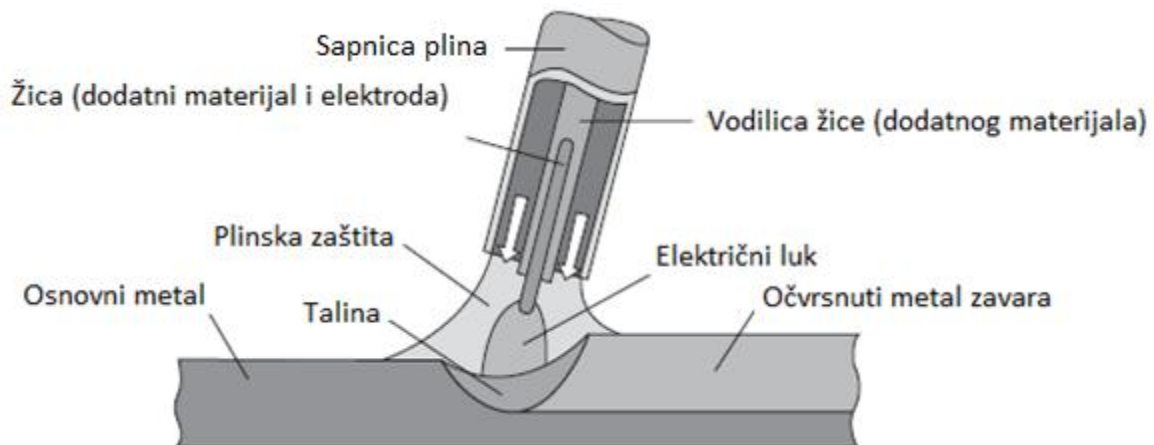
Oznaka zavarivačkog postupka po europskoj normi EN ISO 4063 : 2000 [9] je 141. To je postupak koji koristi netaljivu volframovu elektrodu te zaštitu inertnog plina koji štiti elektrodu, električni luk i talinu od kontaminacije atmosferom kao što je prikazano na slici 1. Električni luk je samo izvor topline te inženjer zavarivanja ima izbor dodati ili ne žicu dodatnog materijala. Električni luk je stabilan na vrlo niskim vrijednostima struje što omogućuje zavarivanje tankih komponenti te sam postupak proizvodi zavare vrlo dobre kvalitete, iako za najbolje rezultate potreban je iskusan zavarivač. Ima nižu brzinu zavarivanja i niži depozit materijala od MIG zavarivanja, zbog čega u nekim situacijama nije isplativ. TIG se u principu koristi za tanje komade od aluminija, do 6 mm debljine. Ima manju penetraciju u osnovni metal nego MIG te se ponekad javljaju poteškoće pri zavarivanju kuteva i korijena zbog nedovoljne penetracije u osnovni metal. [1]



Slika 1. Shema TIG postupka zavarivanja [1]

3.3. MIG postupak zavarivanja

Oznaka zavarivačkog postupka po europskoj normi EN ISO 4063 : 2000 [9] je 131. To je elektrolučni zavarivački postupak s kontinuiranom dobavom žice koja je ujedno i dodatni materijal i elektroda, te su električni luk i talina zaštićeni od atmosfere zaštitnim plinom. Shema procesa prikazana je na slici 2. Prednost MIG zavarivanja je visoka brzina zavarivanja, male zone utjecaja topline nego kod TIG postupka, odlično uklanjanje oksidnog filma i mogućnost zavarivanja u svim pozicijama. Zbog tih razloga MIG zavarivanje je najrašireniji postupak za spajanje aluminija. [1]



3.4. Zaštitni plinovi za zavarivanje aluminija

Zaštitni plinovi štite talinu od kontaminacije atmosferom. Za MIG i TIG postupke zavarivanja koriste se inertni plinovi argon, helij ili njihova kombinacija, klasifikacija tih plinova prema normi ISO 14175 [10] prikazana je u tablici 4 [1].

Najčešće se upotrebljava argon koji se koristi i za ručno i automatsko zavarivanje. Značajno je jeftiniji od helija, proizvodi miran, tih i stabilan električni luk, te daje širok i gladak zavar. Upotrebom argona unosi se najmanje topline u materijal, ujedno je i brzina zavarivanja najniža. Zbog toga postoji rizik nedostatka zavarivanja i poroznosti na debljim komadima. Također, kod zavarivanja argonom može nastati crna čađa na površini zavora koju je moguće lako ukloniti brušenjem [1].

Helij povećava napon električnog luka do 20 % u usporedbi s argonom, što rezultira širim zavarom, dubljom penetracijom i većim unosom topline. Toplija talina sporije se hladi te omogućava vodik da difundira iz otopljenog metala zavora, što čini ovu metodom pogodnom za smanjenje poroznosti. Topliji električni luk omogućava postizanje veće brzine zavarivanja, do tri puta veće nego kod zavarivanja identičnog spoja s argonom. Nedostaci zavarivanja s helijem kao zaštitnim plinom su manja stabilnost električnog luka nego kod argona, te njegova visoka cijena. Helij kao zaštitni plin se najviše koristi u mehaniziranim ili automatskim postupcima zavarivanja [1].

Za ručno zavarivanje i neke mehanizirane aplikacije koriste se mješavine argona i helija jer daju dobre rezultate s karakteristikama koje se nalaze između karakteristika svakog pojedinog plina. Te mješavine su pogodne za upotrebu na debljim materijalima jer povećavaju unos topline i imaju veću toleranciju prihvatljivih parametara zavarivanja nego čisti argon. Ujedno povećavaju produktivnost omogućavajući veće brzine zavarivanja [1].

Bitna stavka kod upotrebe zaštitnih plinova je njihova čistoća. Čistoća plina značajno utječe na kvalitetu zavora. Zaštitni plinovi moraju imati minimalnu čistoću od 99,998 % i nisku razinu vlage, idealno s točkom rosišta nižom od -50 °C (manje od 39 ppm H₂O) - to očitavanje mora biti na izlazu iz sapnice pištolja za zavarivanje, ne na izlazu iz regulatora plina na spremniku [1].

Tablica 3. Klasifikacija inertnih plinova za zavarivanje aluminija [10]

Simbol		Inertni plin	
Glavna grupa	Podgrupa	Ar	He
I	1	100	
	2		100
	3	preostali dio	0,5 ≤ He ≤ 95

*Primjer označavanja smjese koja sadržava 30% helija u argonu: ISO 14175 - I3 - ArHe - 30

3.5. Odabir dodatnog materijala

Odabir dodatnog materijala važan je kako bi se izveo zavar optimalne čvrstoće i bez pukotina, ali postoje i drugi parametri koje treba uzeti u obzir pri odabiru. Za razliku od odabira dodatnog materijala kod čelika, gdje je u većini slučajeva dodatni materijal isti kao i osnovni, uzimajući u obzir sastav, mehanička svojstva i otpor koroziji, aluminijske legure se najčešće zavaruju s dodatnim materijalom čija svojstva ne odgovaraju nekim, ili nijednim od svojstava osnovnog metala. To inženjeru predstavlja problem pri odlučivanju sastava dodatnog materijala. Uz zahtjeve postizanja odgovarajuće čvrstoće, može biti potrebno upotrijebiti dodatni materijal odgovarajuće boje, odgovarajuće otpornosti koroziji, mogućnosti anodizacije te statičkoj izdržljivosti. Smjernice za odabir dodatnog materijala prema normi AWS A5.10/A5.10M:1999 [11] za postizanje specifičnih svojstava kod uobičajenih legura nalaze se u tablici 5. [1]

Tablica 4. Odabir dodatnog materijala za postizanje specifičnih svojstava kod uobičajenih legura (prema normi AWS A5.10/A5.10M:1999) [1]

Osnovni metal	Najviša čvrstoća	Najbolja duktilnost	Otpornost koroziji u slanoj vodi	Najmanja sklonost pukotinama	Najbolje za anodiziranje
1100	4043	1050	1050	4043	1100
2219	2319	2319	2319	2319	2319
3103	4043	1050	1050	4043	1050
5052	5356	5356	5554	5356	5356
5083	5183	5356	5183	5356	5356
5086	5356	5356	5183	5356	5356
5454	5356	5554	5554	5356	5554
5456	5556	5356	5556	5356	5556
6061	5356	5356	4043	4043	5654
6063	5356	5356	4043	4043	6356
6082	4043	4043	4043	4043	4043
7005	5556	5356	5356	5356	5356
7039	5556	5356	5356	5356	5356

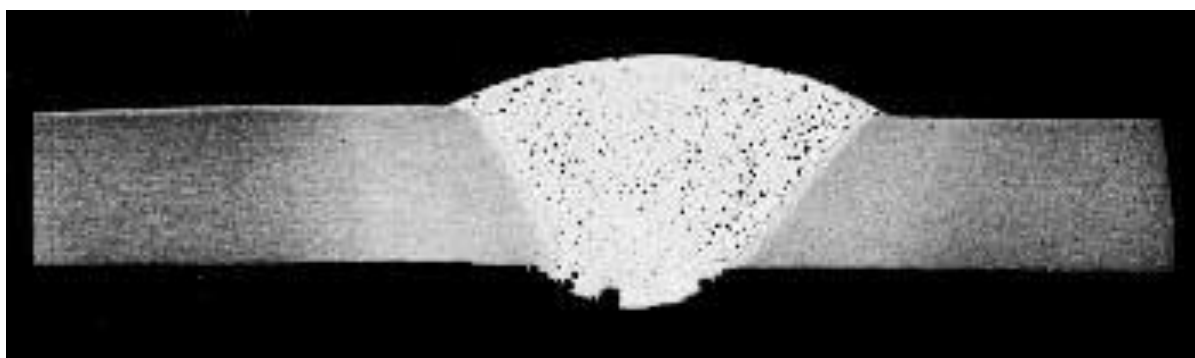
U nastavku slijedi nekoliko specifičnih točaka koje proširuju smjernice dane u tablici 5:

- Kod zavarivanja legura koje sadrže više od 2% magnezija izbjegavati dodatne materijale koje sadrže silicij, jer se stvara magnezijev silicid Mg_3Si , a to povećava krhkost spoja te može dovesti do pucanja spojeva koji su dinamički opterećeni. Vrijedi i obrat, magnezijev silicid će se isto stvoriti kod zavarivanja legura koje sadrže više od 2% silicija sa 5XXX dodatnim materijalom.
- Dodatni materijali 5XXX s više od 5% Mg treba izbjegavati ako je temperatura eksploatacije viša od 65 °C zbog formiranja spoja Al_2Mg koji čini leguru sklonijom napetosnoj koroziji. preporučuju se dodatni materijali poput 5454 ili 5554 koji sadrže manje od 3% Mg.
- Kod zavarivanja aluminija visoke čistoće koji će se koristiti u vodikovom peroksidu preferira se dodatni materijal 5654 visoke čistoće.
- Dodatni materijal 4643 može se upotrijebiti za zavarivanje legura serije 6000 zbog niskog udjela magnezija koji poboljšava reakciju legure na kaljenje.
- Legure serije 1000 su vrlo meke te može doći do problema s dobavom žice dodatnog materijala.
- Legure serije 5000 s niskim udjelom magnezija (<2%) kao npr. 5251 mogu razviti vruće pukotine ukoliko se upotrebljavaju dodatni materijali istog sastava. Umjesto toga trebalo bi upotrijebiti tip Al-Mg5.
- Kod zavarivanja legura serije 7000, dodatni materijal 5039 može omogućiti efektivnije dozrijevanje u zavarima koji sadrže relativno niski postotak otopljenog osnovnog materijala.
- Kod autogenog zavarivanja legura serije 6000 dolazi do pojave pukotina uslijed skrućivanja.
- Titan i cirkonij ponekad se dodaju u dodatne materijale u svrhu smanjenja rizika od vrućih pukotina u zavaru tako što smanjuju veličinu zrna.
- Dodatni materijal 4047 može se koristiti za smanjenje toplih pukotina u zavarima koji imaju visok postotak otopljenog osnovnog materijala u sebi.
- Serija 2000 se općenito smatrala nezavarljivom dok nisu postale dostupne legure sa višim postotkom bakra (>4%) kao npr. legura 2219. Ako je potrebno zavarivati legure s manjim postotkom bakra, tada je dodatni materijal 4047 najbolji izbor [1].

3.6. Problemi zavarljivosti aluminija

3.6.1. Poroznost

Poroznost je problem vezan za metal zavar. Potječe od mjehurića plina otopljenog u rastaljenom metalu, koji, kako se metal hladi i skrućuje, ostaju zarobljeni unutar metala zavar (slika 3). Poroznost može varirati od vrlo sitnih pora do pora od čak 3-4 mm u promjeru. Kod aluminija glavni krivac za poroznost je vodik jer ima visoku topivost u rastaljenom aluminiju, ali vrlo nisku topivost u krutini aluminija, za otprilike 20 puta manju. Zbog toga se smatra da je poroznost gotovo neizbježna kod zavarivanja aluminija. Poroznost je najmanja na autogenim zavarima (bez dodatnog materijala). Od konvencionalnih metoda zavarivanja aluminija, zavar napravljen TIG postupkom ima niže razine poroznosti od zavar napravljenog MIG postupkom (kod MIG postupka postoji veća mogućnost kontaminacije žice dodatnog materijala; veća brzina zavarivanja zahtijeva veću jačinu struje te temperaturu taline, a time i apsorpciju vodika). Poroznost je moguće umanjiti smanjenjem brzine zavarivanja, legiranjem s magnezijem (do 6% magnezija duplo smanjuje apsorpciju vodika), dok bakar, silicij, i povećanje duljine električnog luka imaju suprotan efekt. Dakle, korištenje dodatnog materijala Al-Mg, ako je prihvatljiv u specifičnoj situaciji, može umanjiti poroznost. Izvori vodika su razni, no jedan od primarnih izvora je potrošni materijal za zavarivanje (prašak, elektrode, plin). Vлага koja se nalazi u praškovima i oblogama elektroda, tijekom zavarivanja se raspada u električnom luku na vodik, što rezultira poroznošću, stoga se postupci koji koriste prašak i obložene elektrode ne koriste za zavarivanje aluminija. Često se previde plinovi kao izvor vlage. Idealni plin za upotrebu treba imati temperaturu rosišta nižu od -50 °C. Također, potrebno je provjeravati propusnost ventila i cijevi kroz koje se dovodi zaštitni plin, jer bi kroz pukotine mogao ući zrak te kontaminirati zavar. Cijevi za dovod zaštitnog plina ako se dugo ne upotrebljavaju mogu kondenzirati vlagu u sebi. Na kraju, izvor poroziteta može biti osnovni metal i dodatni materijal. Izuzetno je važno očistiti površinu metala prije zavarivanja. Čišćenje se mora sastojati od odmašćivanja, iza kojeg slijedi mehaničko čišćenje [1].

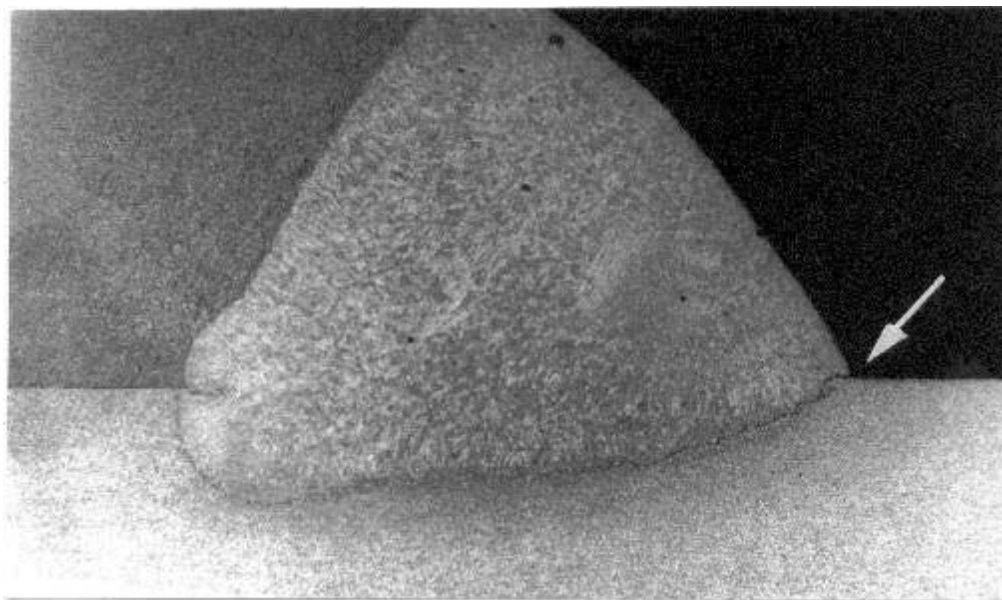


Slika 3. Fino raspršena poroznost u čeonom spoju aluminija debljine 6mm (TIG) [1]

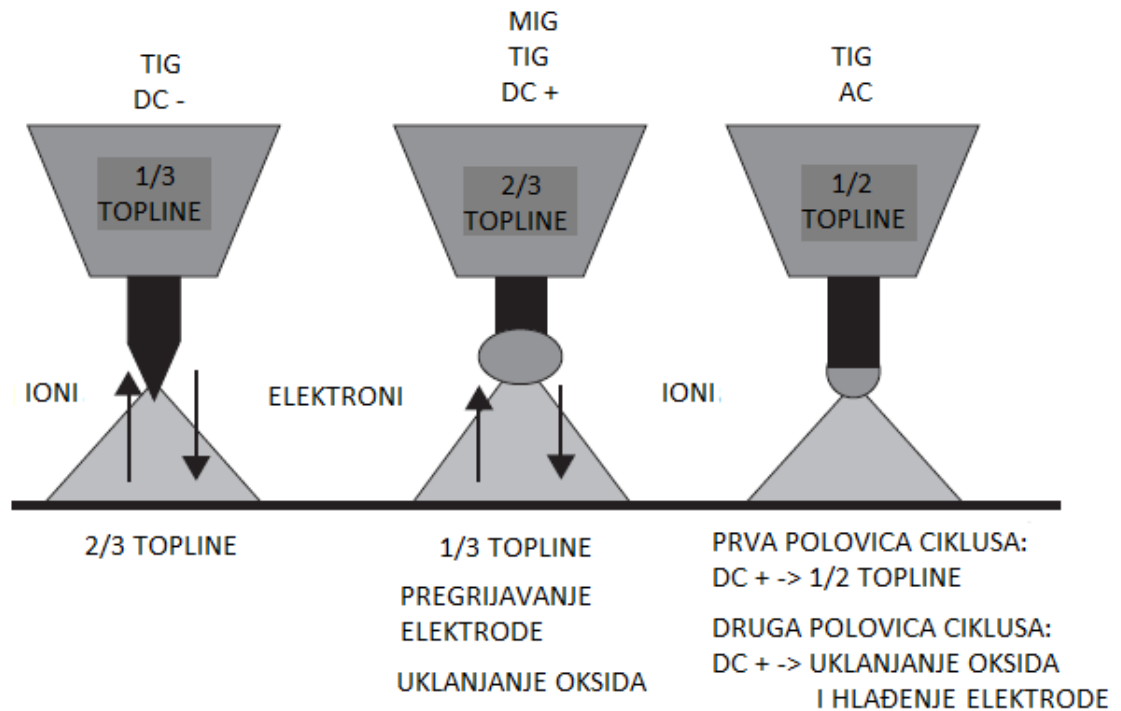
3.6.2. Uklanjanje oksidnog sloja tijekom zavarivanja

Temperatura taljenja aluminijevog oksida je 2060 °C, dok je temperatura taljenja aluminija 660 °C, tako velika razlika u temperaturama taljenja zahtijeva čišćenje oksidnog sloja s površine aluminija prije zavarivanja kako bi se mogla postići odgovarajuća kvaliteta zavara.

Oksidni sloj potrebno je ukloniti kako bi se smanjio rizik od poroznosti, a isto tako potrebno je uklanjanje tog sloja *tijekom* zavarivanja kako bi se izbjegli defekti kao što su lijepljenje i zatvaranje oksidnog sloja unutar zavara. Slika 4. prikazuje oksidni sloj "zarobljen" unutar zavara, što kompromitira čvrstoću zavara. Aluminijev oksid (Al_2O_3) je oksid koji se vrlo brzo formira i zbog toga daje aluminiju izvrsnu korozijsku otpornost. Izuzetno teško ga je ukloniti zavarivačkim postupcima koji koriste prašak ili obloženu elektrodu jer moraju biti vrlo agresivni da uklone oksidni sloj. Kod postupaka zavarivanja koji imaju plinsku zaštitu događa se fenomen poznat kao *katodno čišćenje*. Naime, kada je elektroda spojena na pozitivan pol izvora istosmjerne struje, tok elektrona ide od radnog komada prema elektrodi, a ioni idu u suprotnom smjeru, od elektrode prema radnom komadu te "bombardiraju" površinu radnog komada i tako uništavaju oksidni sloj te omogućavaju stvaranje taline i spajanje komada. MIG postupak koristi samo istosmjernu (DC - direct current) s pozitivnim polom na elektrodi (DCEP), dok TIG postupak većinom koristi izmjeničnu struju (AC - alternating current) osim u specijalnim slučajevima kada se može koristiti DCEP ili DCEN. Izmjenična struja kod TIG postupka koristi se zbog kompromisa između dvaju polova a to je da se oksidni sloj uklanja na pozitivnom poluciklusu, a elektroda se hladi u drugom poluciklusu - spojena na negativan pol izvora. Efekt polariteta na katodno čišćenje i balans topline prikazan je na slici 5.[1]



Slika 4. Oksidni sloj "zarobljen" unutar zavara [1]



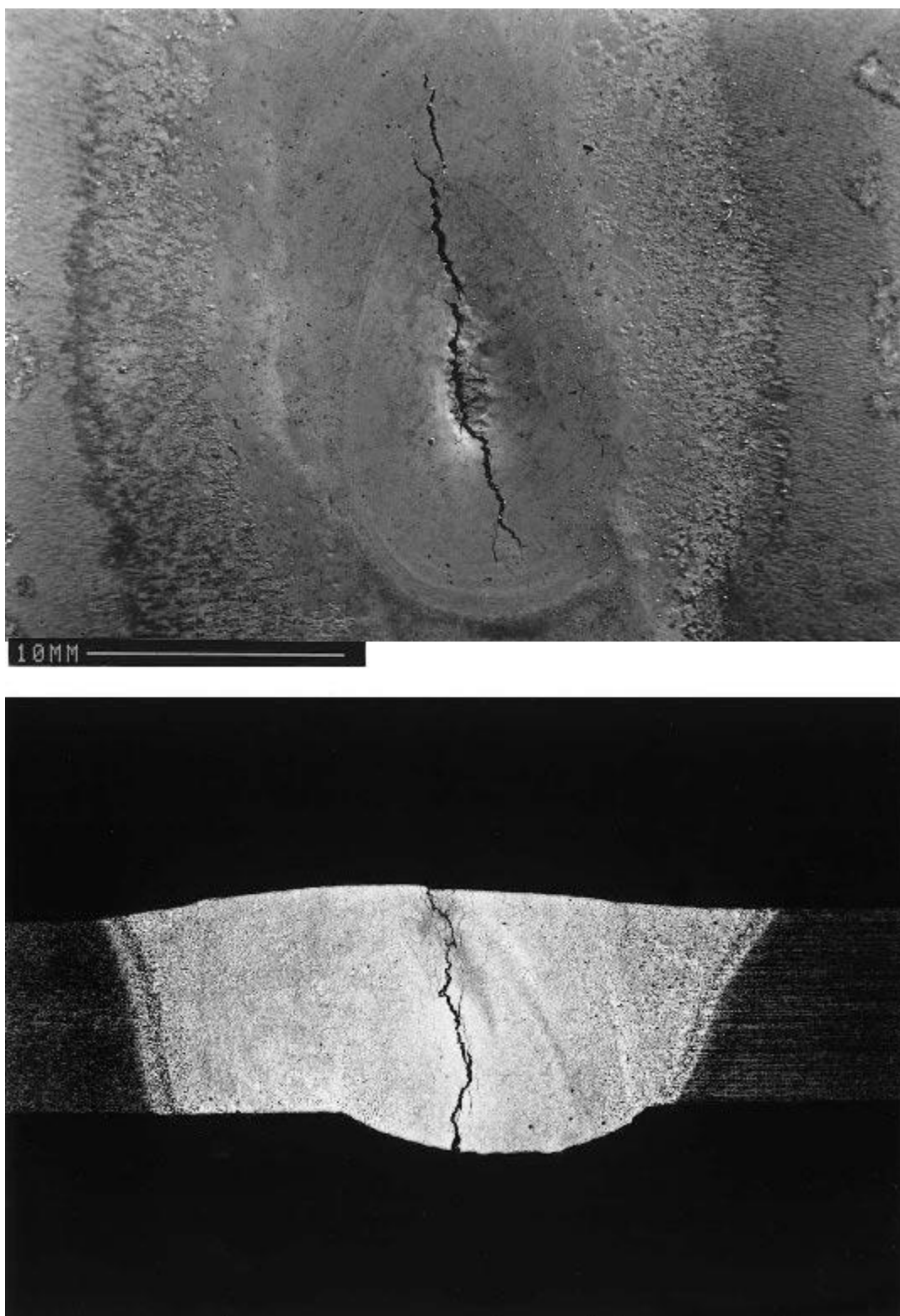
Slika 5. Efekt polariteta na katodno čišćenje i balans topline kod MIG i TIG zavarivanja [1]

3.6.3. Tople pukotine

Tople pukotine obično ne nastaju u čistim metalima, nego u određenim legurama. Tople pukotine nastaju samo u aluminiju, nego i u čelicima, te legurama nikla i bakra. Osnovni mehanizam nastajanja funkcija je načina na koji metalna legura skrućuje tijekom hlađenja. Dodatak legirnih elemenata čistom metalu promijenit će temperaturu pri kojoj metal skrućuje, što može rezultirati stvaranjem drugačijih faza - čvrste otopine, eutektika i intermetalne smjese. Sastav legure s najnižom točkom taljenja poznat je kao eutektički sastav koji skrućuje pri određenoj temperaturi. Ostali ne-eutektički sastavi skrućuju u rasponu temperatura. Prva čestica koja skrutne ponaša se kao klica na koju se atomi pričvršćuju, te formiraju dendrit. Dendrit se povećava dok se njegove čestice ne počinju sudarati sa susjednim dendritom. Tamo gdje se čestice sudare nastaje granica između dendrita, koja se naziva granica zrna. Posljedica tog procesa solidifikacije je ta da legirni element sa najnižom temperaturom taljenja bude odgurnut od klice prema granici zrna i tamo bude "zarobljen". Ako je razlika u temperaturi nakupine tog legirnog elementa i eutektika velika, nastaje tekući film duž granice zrna, te može doći do razdvajanja granica zrna kako se taj tekući film hladi i skuplja. Rezultat je prikazan na slici 6. Taj efekt kod većine metala uzrokovan je nečistoćama i zalutalim legirnim elementima.

Ako dolazi do nastajanja toplih pukotina, potrebno je primijeniti jednu ili više od sljedećih metoda:

- Smanjenje veličine zrna. Mali dodaci elemenata kao što su titan, cirkonij ili skandij ponašat će se kao klice za formaciju vrlo finih zrna prilikom solidifikacije. To se može postići i dodatnim materijalima legiranim s titanom i/ili cirkonijem.
- Kontrola sastava taline zavara dodavanjem dodatnog materijala kojim bi se dobio sastav legure koja je izvan sastava sklonog pojavi toplih pukotina.
- Odgovarajuća priprema spoja i razmak između komada kojima će se postići stvaranje metala zavara čiji sastav je izvan raspona sastava unutar kojeg su legure rizične za zavarivanje zbog pojave toplih pukotina.
- Upotreba najviše brzine zavarivanja. Visoka brzina skraćuje vrijeme u kojem je zavar u rizičnom rasponu temperatura pri kojima se pojavljuju tople pukotine. Visoka brzina zavarivanja također smanjuje veličinu ZUT-a te posljedično smanjuje naprezanja uslijed kontrakcije tijekom hlađenja zavara.
- Upotreba više prolaza manjeg volumena umjesto jednostrukih prolaza velikog volumena.
- Odabir zavarivačkih i montažnih sekvenci koje minimiziraju ograničenja i zaostala naprezanja
- Upotreba vanjske sile kako bi se zavar održao pod tlačnim opterećenjem dok je u rasponu sastava rizičnom za pojavu toplih pukotina.
- Odabir dodatnog materijala s točkom taljenja koja je blizu točki taljenja osnovnog metala. [1]

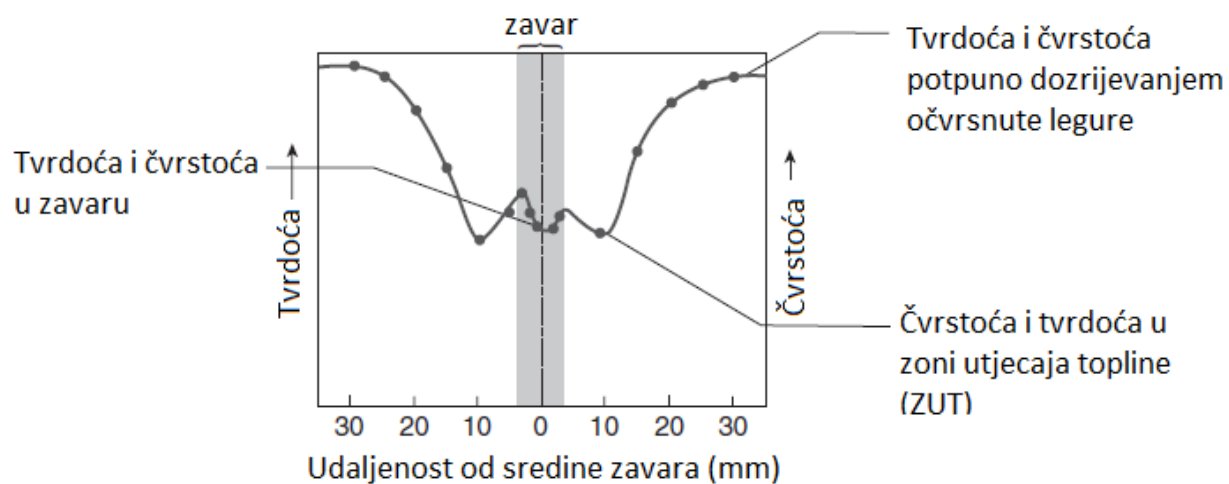


Slika 6. Tople pukotine: (a) U završetku TIG zavora u leguri A5083; (b) u sučeonom spoju 3mm debelih ploča legure A6082 sa dodatnim materijalom 4043, TIG postupak [1]

3.6.4. Gubitak čvrstoće uslijed zavarivanja

Kako bi se postigao zavar, komponente koje će se zavariti moraju biti zagrijane na visoku temperaturu, npr. kod TIG i MIG postupaka, iznad temperature taljenja kako bi se omogućilo spajanje komponenti. Toplina unesena u metal prilikom zavarivanja stvara tri različite zone - zonu zavora u sredini spoja, zonu utjecaja topline (ZUT) u osnovnom metalu i nepromijenjen osnovni metal. Zona utjecaja topline može biti dodatno podijeljena na područja sa specifičnim svojstvima koja ovise o samoj leguri. Pošto će ZUT biti podvrgnuta jednom ili više ciklusa grijanja i hlađenja njena svojstva mogu radikalno drugačija od onih u osnovnom metalu. To je pogotovo slučaj kod aluminijskih legura koje su očvršnute hladnom deformacijom ili precipitacijskim očvršćenjem. Jedan od aspekata toga je širina zone utjecaja topline, funkcija visoke toplinske provodljivosti aluminijske materije te posljedične veličine područja u kojem je došlo do gubitka čvrstoće. Samo kada je legura u stanju kao što je lijevana (bez dodatne obrade), ili žarena, svojstva zone utjecaja topline će biti kao i kod osnovnog metala [1].

Kod toplinski neobradivih legura, a to su serija 1000, 3000, 4000 i serija 5000 nije moguće povratiti prethodna svojstva metala, osim mehaničkom deformacijom, a to nikada nije praktično za zavarene konstrukcije. No, kod legura koje su toplinski obradive, situacija je malo drugačija. Te legure se prvo zagrijavaju na oko 540 °C te ih se drži na toj temperaturi kratko vrijeme i zatim kade u vodi. Tako se postiže T4 toplinsko stanje i legura u tom stanju imaju značajno čvrstoću nego ista legura u stanju O. Ovisno o leguri, "prirodno dozrijevanje" na sobnoj temperaturi može dovesti do dodatnog povišenja čvrstoće tijekom vremena, obično se radi o danima, no može najviše potrajati nekoliko tjedana. Nakon toga svojstva ostaju stabilna desetljećima. Međutim, većinu legura se dodatno toplinski obrađuje kako bi se dobila najbolja mehanička svojstva. Toplinska obrada sastoji se od držanja metala na 205 °C nekoliko sati. Tijekom tog vremena držanja, legirni elementi koji su bili otopljeni u prethodnoj toplinskoj obradi kontrolirano se talože, što očvršćuje leguru. Ovo metalurško stanje naziva se T6 i to je stanje najviše čvrstoće za toplinski obradive legure. Kako je prije spomenuto, proces dozrijevanja se izvodi na 205 °C, a bilo koji elektrolučni postupak je mnogo više temperature od toga. Stoga, zavarivanje je kao dodatna toplinska obrada za zonu utjecaja topline (ZUT). Radi toga dolazi do degradacije svojstava materijala, pogotovo ako se svojstva nakon zavarivanja uspoređuju s T6 svojstvima. Kao što je spomenuto ranije, kod toplinski obradivih legura moguće je povratiti neka od svojstava osnovnog metala nakon zavarivanja. Slika 7. prikazuje graf čvrstoće i tvrdoće u odnosu na udaljenost od zavora za leguru 6061. Vidljiv je značajan pad čvrstoće i tvrdoće u samoj sredini zavora, zato se obično toplinska obrada za dobivanje željenih mehaničkih svojstava izvodi nakon zavarivanja [12].



Slika 7. Utjecaj zavarivanja na leguri 6061 T6 dozrijevanjem očvrsnutoj leguri [1]

4. NERAZORNE METODE ISPITIVANJA ZAVARA

Nerazorne metode ili NDT (non destructive testing) mogu se koristiti za greške koje bi bile teške ili nemoguće za otkriti vizualnom inspekcijom. Metode se koriste tijekom proizvodnje kao oruđe kontrole kvalitete za procjenu kvalitete posla. Opseg NDT - a ovisi o primjeni i kritičnosti spoja i generalno je određena u mjerodavnom standardu ili odredbi ugovora. Važno je da NDT bude uključen u planiranje procesa izrade jer može zahtijevati značajno vrijeme i resurse. Pun obuhvat NDT-a mora biti uračunat u dizajn kako bi se izbjeglo kašnjenje radova. [1]

4.1. Ispitivanje penetrantima

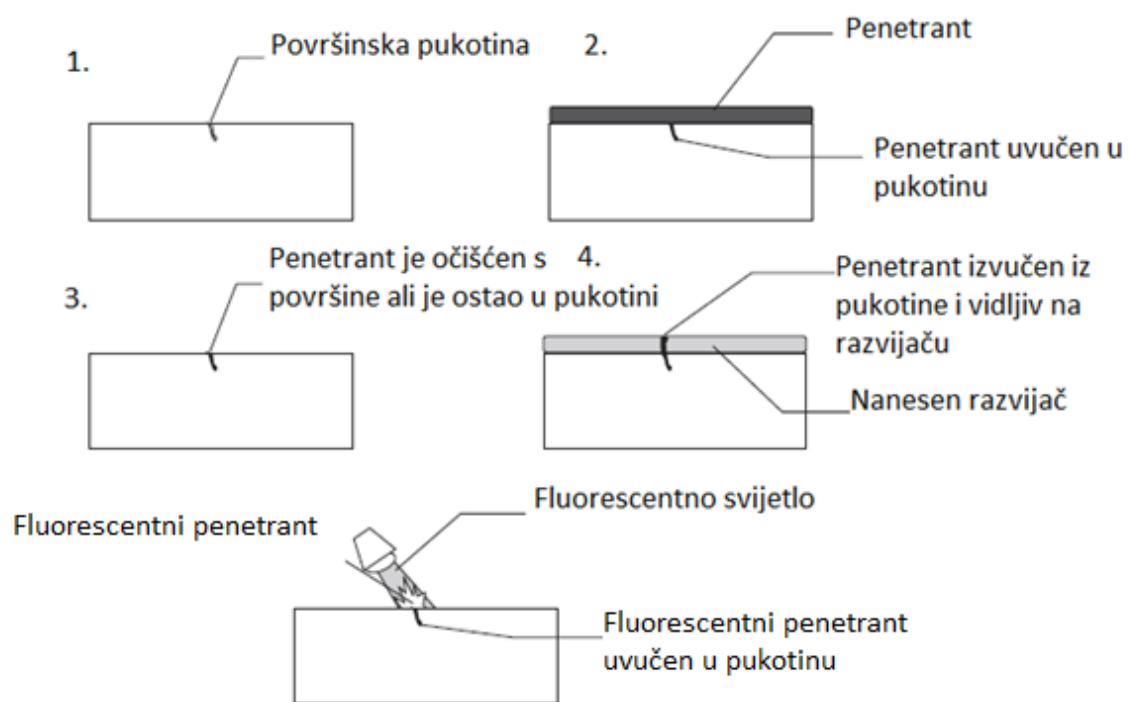
Tehnika sposobna ispitivati samo površinske greške. Funkcionira tako da se željena površina za ispitivanje dobro očisti i odmasti, zatim se obojeni ili fluorescentni penetrant nanese po površini zavara, te penetrira u pukotine. Nakon čišćenja viška penetranta s površine, na površinu se može nanijeti razvijач koji izvlači pigment iz pukotina, ili u slučaju upotrebe fluorescentnog penetranta površina se izloži ultraljubičastom svjetlu te se otkrivaju pukotine i pore u koje je penetrant ušao. Shema postupka prikazana je na slici 8. Slika 9. prikazuje izgled indikacije pukotine kod tipičnog ispitivanja penetrantom. Fluorescentni penetrant ima veću osjetljivost od obojenog, ali zahtijeva upotrebu ultraljubičastog svjetla i tamnije sobe ili prostorije. S druge strane, obojeni penetrant, sredstvo za čišćenje i razvijач se mogu lako prenositi te su idealni za terensku upotrebu [1].

Prednosti:

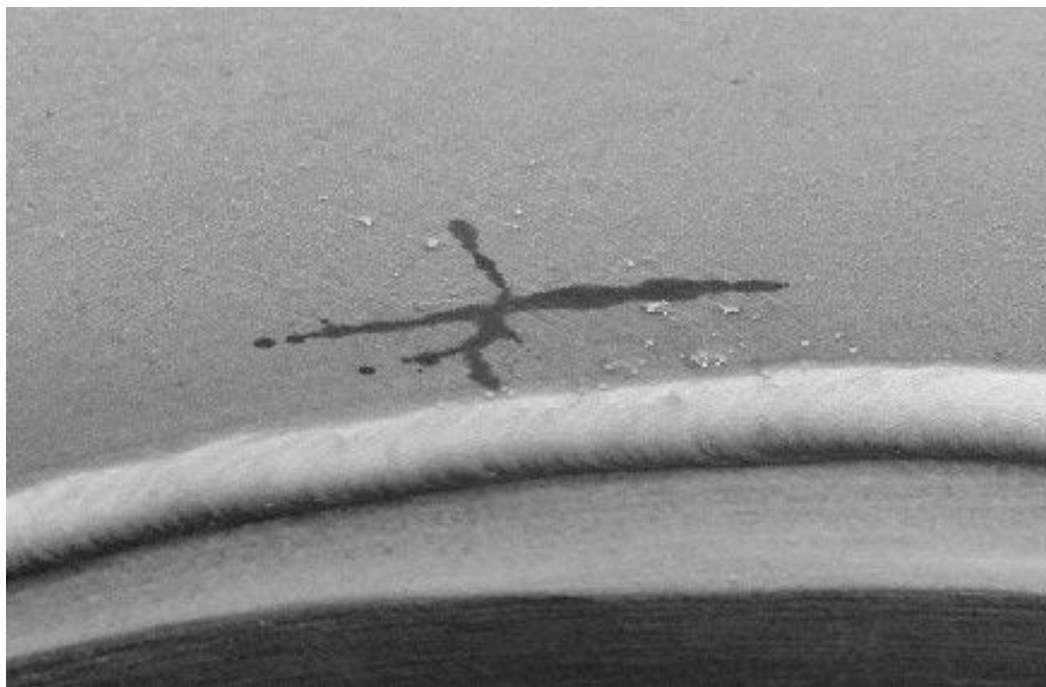
- Moguća upotreba na magnetičnim i nemagnetičnim materijalima.
- Lako prenosiva oprema.
- Mogućnost brzog ispitivanja velikih površina.
- Moguća upotreba na malim komadima složene geometrije.
- Jednostavna, jeftina i lagana za upotrebu i očitavanje rezultata.

Mane:

- Moguće detektiranje samo površinskih grešaka.
- Potrebna pažljiva priprema i čistoća površine.
- Nije moguće mnogo puta testirati isti komad.
- Postoji mogućnost opasnosti za zdravlje prilikom ispitivanja ukoliko penetrant dođe u direktan kontakt s kožom, stoga je potrebno nositi zaštitno odijelo i rukavice.
- Kod ispitivanja u zatvorenim prostorima postoji opasnost od udisanja otrovnih para [1].



Slika 8. Shema postupka ispitivanja penetrantima [1]



Slika 9. Izgled rezultata testa nakon ispitivanja penetrantom [1]

4.2. Ispitivanje vrtložnim strujama

To je metoda koja se koristi na materijalima koji su vodiči električne struje. Zavojnica kroz koju prolazi izmjenična struja postavlja se u blizinu komada koji treba ispitati. Tako se inducira vrtložna struja u komadu koji ispituje. Greške u komadu koji ispituje prekidaju tok vrtložne struje i te perturbacije se detektiraju pomoću druge zavojnice. Te dvije zavojnice mogu biti postavljene jedna pored druge ili mogu biti zajedno namotane kako bi činile jednu sondu, npr. mogu biti oblikovane da stanu unutar ili izvan cijevi. Oprema se kalibrira prema primjerku koji nema grešaka. Preciznost ovisi o metalurškom stanju ispitivanog komada, o udaljenosti zavojnica od komada, te dimenzijama zavojnice. Zbog tih razloga ispitivanje vrtložnim strujama se rijetko koristi na zavarenim komponentama, iako je izvrsno za ispitivanje šavno zavarenih cijevi. Kako tehnologija napreduje, ova metoda postaje sve lakše prenosiva (za teren) i jednostavnija za upotrebu. Mikroprocesori, jedinice za pohranu ispitivanja, sve osjetljivije sonde te sve lakša elektronika omogućavaju ovoj metodi da se koristi na terenu za konstrukcije u eksploataciji, gdje je to dosta efektivan alat za detektiranje pukotina i korozije [1].

4.3. Ispitivanje ultrazvukom

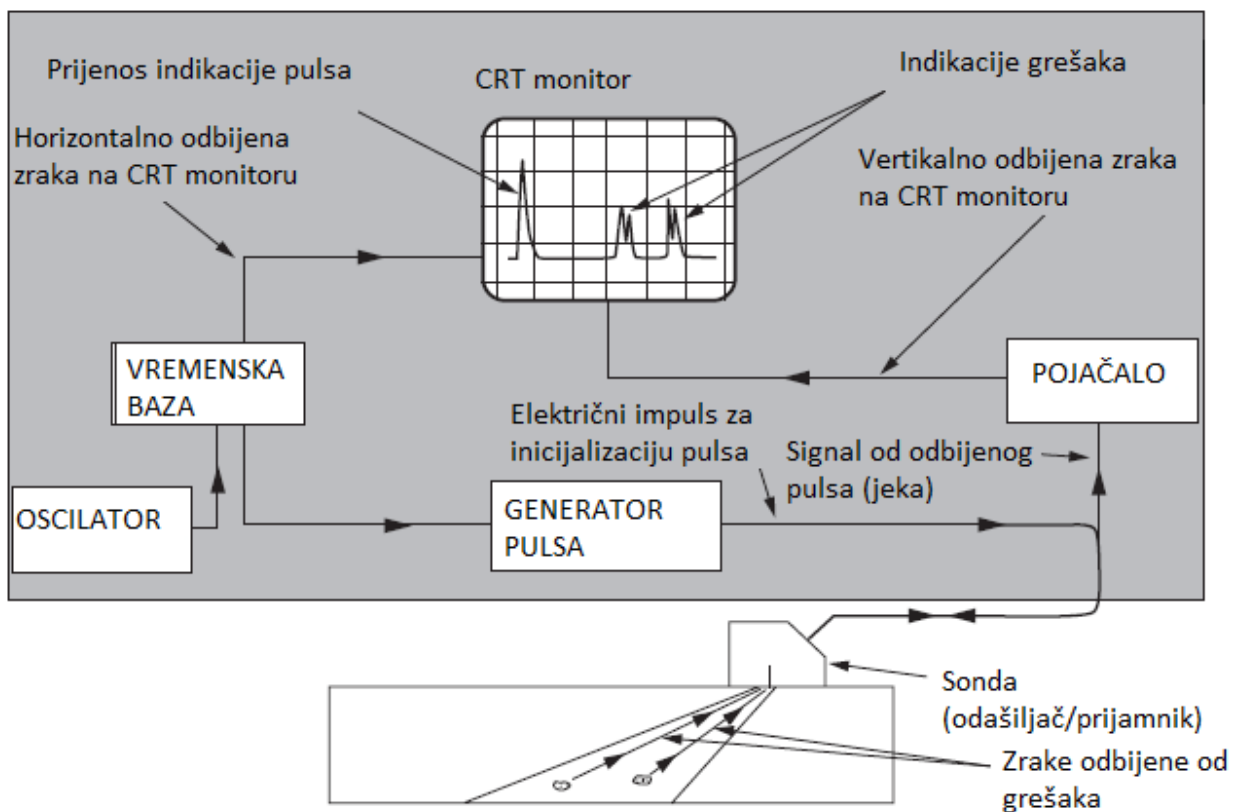
Ispitivanje ultrazvukom koristi isti princip kao sonar u podmornicama. Zvučni val koji emitira odašiljač se odbija od objekta (greške), te ga prijamnik detektira. Smjer i udaljenost tog objekta mjeri se vremenom koje prođe između odašiljanja valova i primanja "jeke". Princip je ilustriran na slici 10. Dubinske greške kao što je npr. nedostatak zavarivanja, manjak penetracije i pukotine u dodatku s volumetričkim greškama kao "zarobljena" troska i poroznost lako se otkrivaju. Uspješnost detekcije ovisi o uvježbanim i iskusnim operaterima koji dobro poznaju karakteristike metala koji se ispituje, smjer zrake, njenu amplitudu i frekvenciju te geometriju zavora. Preporučuje se da operater bude ovlašten od strane BINDT (Britanski institut za nerazorna ispitivanja) ili ASNT (Američko društvo za nerazorna ispitivanja). Prije ispitivanja potrebno je izvršiti pripremu. Priprema se sastoji od prikupljanja informacija o materijalu koji se ispituje, toplinskoj obradi, postupku, proceduri i pripremi zavarivanja. Tipična inspekcija sastoji se od ispitivanja osnovnog metala u blizini zavora. Kako bi se to učinilo, površina mora biti čista od kamenca, kapljica metala te ne smije biti gruba. Kako bi se osiguralo da se sve greške u zavaru i ZUT-u detektiraju, sonda mora proći zavar punom dužinom, te okomito na zavar kako bi se vidjele i greške koje su paralelno ultrazvučnoj zruci. Interpretacija grešaka na korijenskim prolazima se izbjegava jer se greške teško očitavaju i često budu krivo interpretirane [1].

Prednosti:

- Jako dobra metoda za otkrivanje ravninskih grešaka i pukotina.
- Lako se otkriva dubina greške.
- Prenosiva oprema.
- Pristup komadu je dovoljan samo s jedne strane.
- Nema opasnosti za zdravlje osoblja koje se bavi ispitivanjem.

Mane:

- Potrebni vrlo iskusni operateri.
- Površinske greške se teško otkrivaju.
- Točno otkivanje veličina grešaka koje su manje od 3mm je teško ili nemoguće.
- Geometrija zavarenog spoja može ograničiti mogućnost ispitivanja i onemogućiti točno očitavanje grešaka.
- Nema trajne pohrane ispitivanja.
- Metoda je spora i zahtjevna [1].



Slika 10. Shema ultrazvučnog testiranja metala [1]

4.4. Radiografsko ispitivanje (RT)

Elektromagnetsko zračenje ima svojstva koja su korisna za industrijske radiografske potrebe. Zrake putuju u ravnim linijama i ne mogu se otkloniti ili biti odbijene lećama ili zrcalima; valne duljine omogućuju zračenju da prolazi kroz razne materijale, uključujući većinu metala, no ako prođe kroz živo tkivo, zračenje će ga oštetiti i zato postoji opasnost za zdravlje i sigurnost osoblja. Zračenje, ili X-zrake iz prikladnog izvora, ili gama zrake iz radioaktivnog izotopa, apsorbira se kako prolazi kroz materijal. Ta apsorpcija povećava gustoću materijala te ako se na suprotnu stranu od izvora zračenja postavi fotografski film, mjesta manje gustoće na njemu će se prikazati kao tamnija (slika 11), te će tvoriti sliku unutarnjih značajki testnog primjerka nakon što film bude obrađen. Praznine, nečistoće, pukotine i defekti geometrije mogu biti lako otkriveni, iako ravninske greške paralelne zraci mogu ostati ne detektirane. Kako bi se obavilo radiografsko snimanje, potreban je izvor zračenja, film koji mora biti u zaštitnoj foliji prije ispitivanja kako bi ga se zaštitilo od svjetla, te metoda razvijanja filma. Razvijanje filma obično se obavlja u tamnoj sobi gdje se film može oprati, osušiti i pogledati [1].

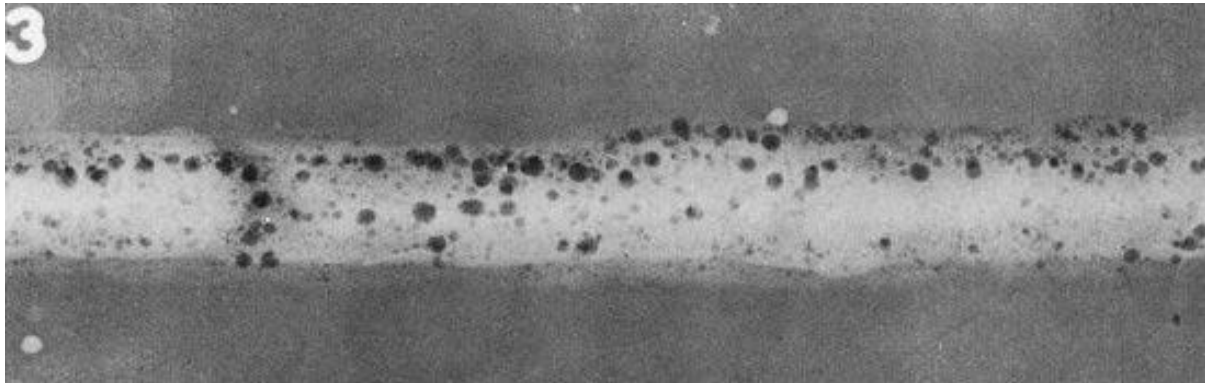
Radiografska ispitivanja s X - zrakama općenito su bolje kvalitete od onih s gama zrakama. Danas se koristi radiografska oprema u realnom vremenu. Fluoroskopski ekran i video kamera omogućuju da se slika lako pohrani, pregleda i procijeni. To ima očite prednosti u pogledu brzine identificiranja i ispravljanja zavarivačkih grešaka. Radiografska ispitivanja trebaju biti povjerena dobro uvježbanim i iskusnim ispitivačima koji se time bave, te filmovi trebaju biti pregledani u tamnoj sobi s uređajem posebno napravljenim za gledanje radiografskih filmova [1].

Prednosti:

- Moguća je trajna pohrana rezultata ispitivanja.
- Moguća je detekcija površinskih i dubinskih grešaka te je metoda pogotovo dobra za pronalaženje volumetričkih grešaka kao npr. nečistoća i poroznosti.
- Oprema je prenosiva, pogotovo za izvore gama zračenja.
- Svi materijali se mogu ispitivati.

Mane:

- Visoki investicijski troškovi.
- Opasnost od radijacije za osoblje.
- Pristup radnom komadu potreban s obje strane - za izvor zračenja na jednoj strani i za film na drugoj strani.
- Poteškoće pri otkrivanju ravninskih grešaka i finih pukotina ako su paralelne zraci.
- Ograničenje na debljinu koja može biti ispitivana.
- Potrebno iskusno i stručno osoblje.
- Teško je odrediti dubinu i širinu greške [1].



Slika 11. Poroznost u sučeonom zavaru legure serije 4000 zavarene TIG postupkom [1]

5. ALUMINIJSKE LEGURE U BIKIKLISTIČKOJ INDUSTRIJI

5.1. Upotreba aluminija za okvire bicikala

Okvir bicikla mora odolijevati brojnim naprezanjima različitog podrijetla. Kočenje, okretanje pedala i neravnine terena samo su neke od sila koje utječu na okvire. Materijal, konstrukcija i oblikovanje okvira stoga su najvažniji prilikom stvaranja učinkovitog i pouzdanog bicikla [13]. Aluminij je materijal prvog izbora za većinu proizvođača bicikala, slijede ga čelik, titan i ugljična vlakna. Aluminij ima poželjan omjer čvrstoće i težine po nižoj cijeni od ostalih materijala koji se koriste za okvire bicikala. Ipak, u usporedbi s drugim materijalima, aluminij je podložniji lomu zbog zamora materijala na manjem broju ciklusa ponavljanja te ima konačan zamorni vijek trajanja. Lomovi okvira uzrokovani zamorom materijala koji se dogode uslijed normalnog korištenja bicikala mogu imati razorne efekte za proizvođače bicikala, rezultirajući u skupim opozivima okvira, legalnim obvezama, te gubitku imidža proizvoda. [14]. U tablici 5. navedeno je nekoliko primjera opoziva okvira bicikala od poznatijih proizvođača između 2002. i 2011. godine. Slika 12 prikazuje moj vlastiti okvir proizvođača NORCO na kojem je nastala pukotina na zavaru koji spaja donju i prednju cijev.

Tablica 5. Opozivi okvira za bicikle između 2002. godine i 2011. godine.[]

Godina	Proizvođač	Opis loma	Posljedica	Literatura
2002.	CANNONDALE	Mogućnost puknuća okvira zavora donje i prednje cijevi.	Opoziv modela Gemini 1000, Gemini 2000 i Gemini 900 proizvedenih 2002. i 2003. godine	[15]
2010.	NINER	Pukotine u zavarima na prednjem trokutu okvira	Opoziv svim modela JET 9	[16]
2010.	FELT	Mogućnost puknuća zavora donje i prednje cijevi	Opoziv modela Felt S32, B12, B14 i B16	[17]
2011.	NORCO	Mogućnost puknuća zavora donje i prednje cijevi	Opoziv svih okvira Norco Havoc proizvedenih 2011. godine	[18]
2011.	GIANT	Mogućnost puknuća zavora cijevi sjedala i gornje cijevi	Opoziv modela Anthem X29r proizvedenih 2011. godine	[19]

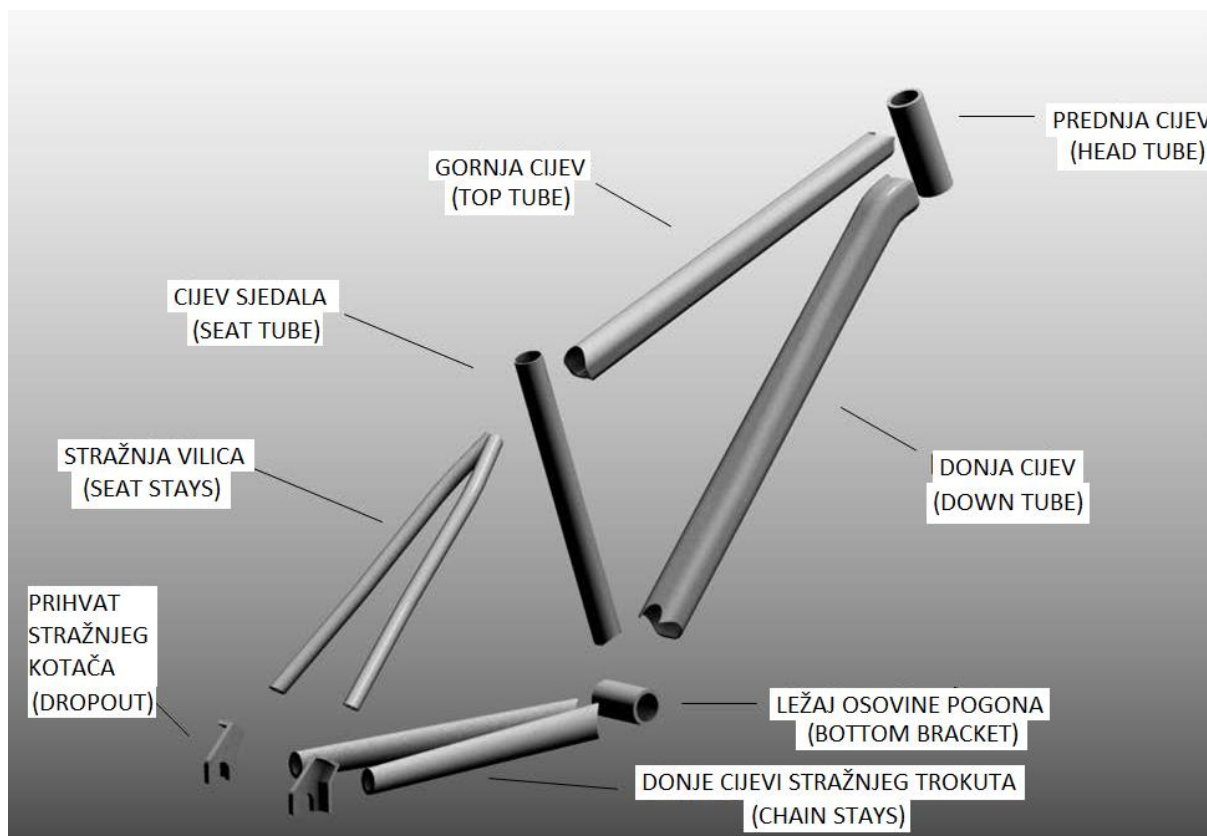
Iz tablice možemo zaključiti da je kritičan zavar na okviru bicikla onaj na spojevima prednje i gornje cijevi i spoja prednje i donje cijevi.



Slika 12. Prikaz pukotine na vlastitom okviru bicikla (spoj donje i prednje cijevi)

5.2. Tipičan dizajn i izgled okvira za bicikle

Najpopularniji dizajn okvira bicikla poznat je pod nazivom dijamant ili dupli trokut. Na slici 13 prikazan je izgled i naziv dijelova takvog okvira. Ovaj dizajn se vrlo malo promijenio od samih početaka biciklizma zato što se pokazao idealnim u pogledu čvrstoće i jednostavnosti izrade [20]. Okviri za bicikle se mogu podijeliti u dvije glavne skupine, a to su tvrdorepi (engl. hardtail - HT) prikazan na slici 14. i bicikli s dvostrukim ovjesom (engl. full suspension - FS), prikazan na slici 15.



Slika 13. Izgled okvira "dupli trokut" te nazivi njegovih dijelova [14]



Slika 14. Izgled "tvrdorepog" (HT) okvira bicikla [21]

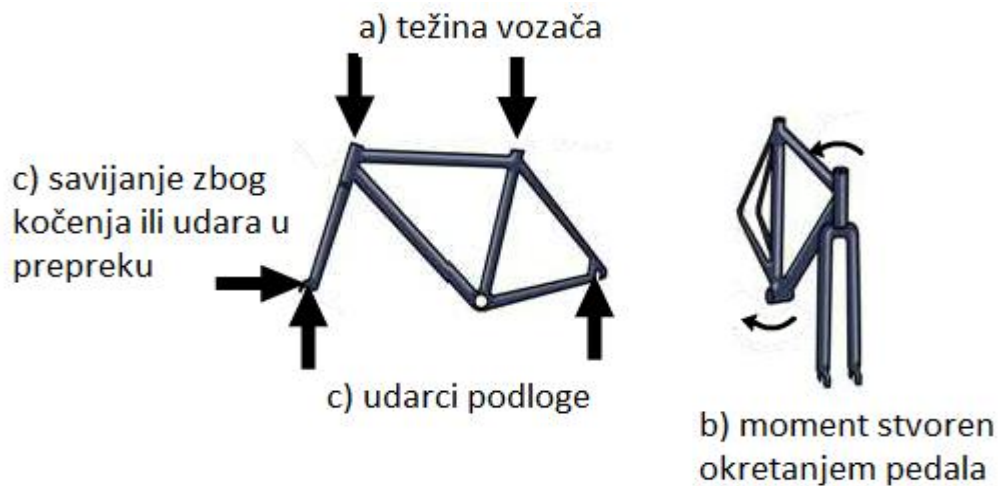


Slika 15. Izgled okvira za bicikl s dvostrukim ovjesom (FS) [22]

5.3. Naprezanja koja opterećuju okvir bicikla

Okviri su tijekom uporabe podvrgnuti rasponu mehaničkih opterećenja (slika 16):

- statičko opterećenje uzrokovano težinom vozača.
- cikličko dinamičko opterećenje uzrokovano okretanjem pedala (uzrokuje torziju donje cijevi).
- dinamičko opterećenje uzrokovano udarima ili vibracijama na grubim podlogama [23].



Slika 16. Mehanička opterećenja na okvir bicikla [23]

5.4. Dvije glavne aluminijske legure u biciklističkoj industriji

U industriji proizvodnje okvira za bicikle najčešće se koriste legure EN AW-6061 i EN AW-7005. Razlog tomu su njihova raspoloživost te njihova svojstva. Ipak, pojavljuju se i druge legure, poput EN AW-6066 i EN AW-6069 od nekih proizvođača, no zasada u vrlo ograničenom broju. Postoje i mnoge druge legure, poput EN AW-7075 i EN AW-2014, koje su čvršće od EN AW-6061 i EN AW-7005, ali one nisu pogodne za proizvodnju okvira za bicikle jer ih je gotovo nemoguće zavarivati. Kada se radi o okviru bicikla, na razlike između pojedinih legura osim njihovih pojedinih svojstava izmjerenih u laboratoriju, poput vlačne čvrstoće, krhkog loma i slično, utječu faktori poput kvalitete zavara, oblika i debljine cijevi, te geometrija okvira [24].

5.5. Zavarljivost legura serije 6000

Ove legure sadrže mali postotak silicija i magnezija, obično oko 1% svakog od tih elemenata, te mogu biti dodatno legirane s jednako malim postocima mangana cinka i kroma. Serija 6000 osjetljiva je na pucanja u zavaru, pogotovo kada metal zavara ima visok postotak osnovnog metala, kao npr. u korijenskom prolazu zavara. Pucanje se može spriječiti upotrebom dodatnih materijala koji sadrže više postotke silicija, kao 4043, ili s povećanim rizikom od toplih pukotina, dodatni materijal s višim postocima magnezija, poput 5356. Legure ove serije su složene i vrlo ovisne o uvjetima zavarivanja. Autogeno zavarivanje se rijetko koristi zbog rizika od toplih pukotina. Metal zavara sa strukturom bliskom onoj osnovnog metala može prirodno dozreti, ili biti umjetno dozrijevan kako bi se postigla slična čvrstoća, ali nikad ista čvrstoći osnovnog metala koji je dozrio. Gubici čvrstoće u seriji 6000 manji su kod prirodno dozrijevanih legura nego kod umjetno dozrijevanih. Uz kontrolirano nizak unos topline tijekom zavarivanja, čvrstoća spoja neće pasti na čvrstoću u žarenom stanju, nego će biti bliska T4 stanju toplinske obrade - kaljeno i prirodno dozrijevano. [1]

5.5.1. Legura EN AW-6061

Legura EN AW-6061 je jedna od najraširenijih legura u seriji 6000. U tablici 6. navedene su vrijednosti nekih mehaničkih svojstava te legure nakon toplinske obrade T6. Standardna konstrukcijska legura, jedna od najsvestranijih legura koje se mogu toplinski obrađivati koristi se za zahtjeve srednje do visoke čvrstoće i ima dobro svojstvo žilavosti. Primjene variraju od transportnih komponenti, strojnih dijelova i opreme, do rekreacijskih i potrošačkih roba. Legura EN AW-6061 ima izvrsnu korozijsku otpornost na atmosferske uvjete i dobru korozijsku otpornost na morsku vodu. Ova legura također nudi dobre karakteristike završne obrade i dobro reagira na anodiziranje. Lako se zavaruje i spaja raznim komercijalnim metodama. Kako je legura EN AW-6061 toplinski obrađiva, čvrstoća nakon zavarivanja u stanju T6 u zoni zavara će pasti. Odabir primjerenog dodatnog materijala za zavarivanje ovisi o željenim karakteristikama zavara [25].

Tablica 6. Karakteristike legure EN AW-6061 T6 [26]

Svojstvo, simbol	Vrijednost, mjerna jedinica
Tvrdoća, $HB\ 10/500$	95 HB
Vlačna čvrstoća, R_m	310 N/mm ²
Granica razvlačenja, $R_{p0,2}$	276 N/mm ²
Modul elastičnosti, E	68900 N/mm ²
Smična čvrstoća, τ	207 N/mm ²
Modul smicanja, G	26000 N/mm ²
Solidus temperatura, θ_s	582 °C
Likvidus temperatura, θ_L	652 °C
Toplinska vodljivost, λ	167 W/mK

5.6. Zavarljivost legura serije 7000

Serijska 7000, u pogledu zavarivanja može biti podijeljena u dvije skupine. Prva skupina su legure visoke čvrstoće s više od 1% bakra, općenito upotrebljavane u svemirskoj industriji i spajane ne-zavarivačkim tehnikama. Druga skupina su legure srednje čvrstoće koje su razvijene za zavarivanje. Ta druga skupina pri zavarivanju se ponaša vrlo slično kao i legure serije 6000, s gubitkom čvrstoće u ZUT-u, koja može djelomično biti povraćena prikladnom toplinskom obradom. Legure će prirodno dozreti, no može potrajati i do 30 dana da proces dozrijevanja završi. Gubitak čvrstoće u seriji 7000 manji je nego kod serije 6000, što ih u kombinaciji s prirodnim dozrijevanjem čini popularnim izborom za strukture gdje može biti potrebno dodatno održavanje i reparatura. Jedan problem svojstven za seriju 7000 je taj da cink brzo formira oksid tijekom zavarivanja, povećavajući površinsku napetost taline i time povećavajući rizik nedostatka zavarivanja. To zahtijeva upotrebu zavarivačkih procedura u kojima je struja zavarivanja 10-15% veća nego bi bila za seriju legura 5000. Također je otkriveno da je bolje upotrebljavati kraći luk od normalnog, kako bi transfer metala bio u obliku kapljica [1].

5.6.1. Legura EN AW-7005

Toplinski obradiva legura sličnih svojstava kao i legura EN AW-6061, malo niže tvrdoće i nešto više čvrstoće. Sadrži manje od 1% bakra te spada u skupinu zavarljivih legura u seriji 7000. Vrijednosti nekih svojstava te legure navedene su u tablici 7. Legura EN AW-7005 upotrebljava se najčešće u proizvodnji aluminijskih okvira za bicikle. [14]

Tablica 7. Karakteristike legure EN AW-7005 T6 [27]

Svojstvo	Vrijednost
Tvrdoća, $HB_{10/500}$	94 HB
Vlačna čvrstoća, R_m	350 N/mm ²
Granica razvlačenja, $R_{p0,2}$	290 N/mm ²
Modul elastičnosti, E	72000 N/mm ²
Smična čvrstoća, τ	207 N/mm ²
Modul smicanja, G	26000 N/mm ²
Solidus temperatura, θ_s	582 °C
Likvidus temperatura, θ_L	652 °C
Toplinska vodljivost, λ	167 W/mK

6. EKSPERIMENTALNI DIO

6.1. Opis eksperimenta

Eksperiment je proveden na doniranom okviru bicikla koji je imao pukotinu (slika 17). Okvir je bio dio bicikla s dvostrukim ovjesom, dakle sastoji se od dva dijela. Pukotina se nalazila na prednjem trokutu, na spoju donje cijevi i ležaja osovine pogona (slika 18). Ispitivanje se sastojalo od nerazornog ispitivanja napuknutog zavara metodom penetranta, reparature otkrivene pukotine, te ponovnog ispitivanja penetrantima kako bi se utvrdilo da je pukotina uklonjena. Marka proizvođača opreme za ispitivanje penetrantima korištena u eksperimentu je njemačka tvrtka TIEDE.



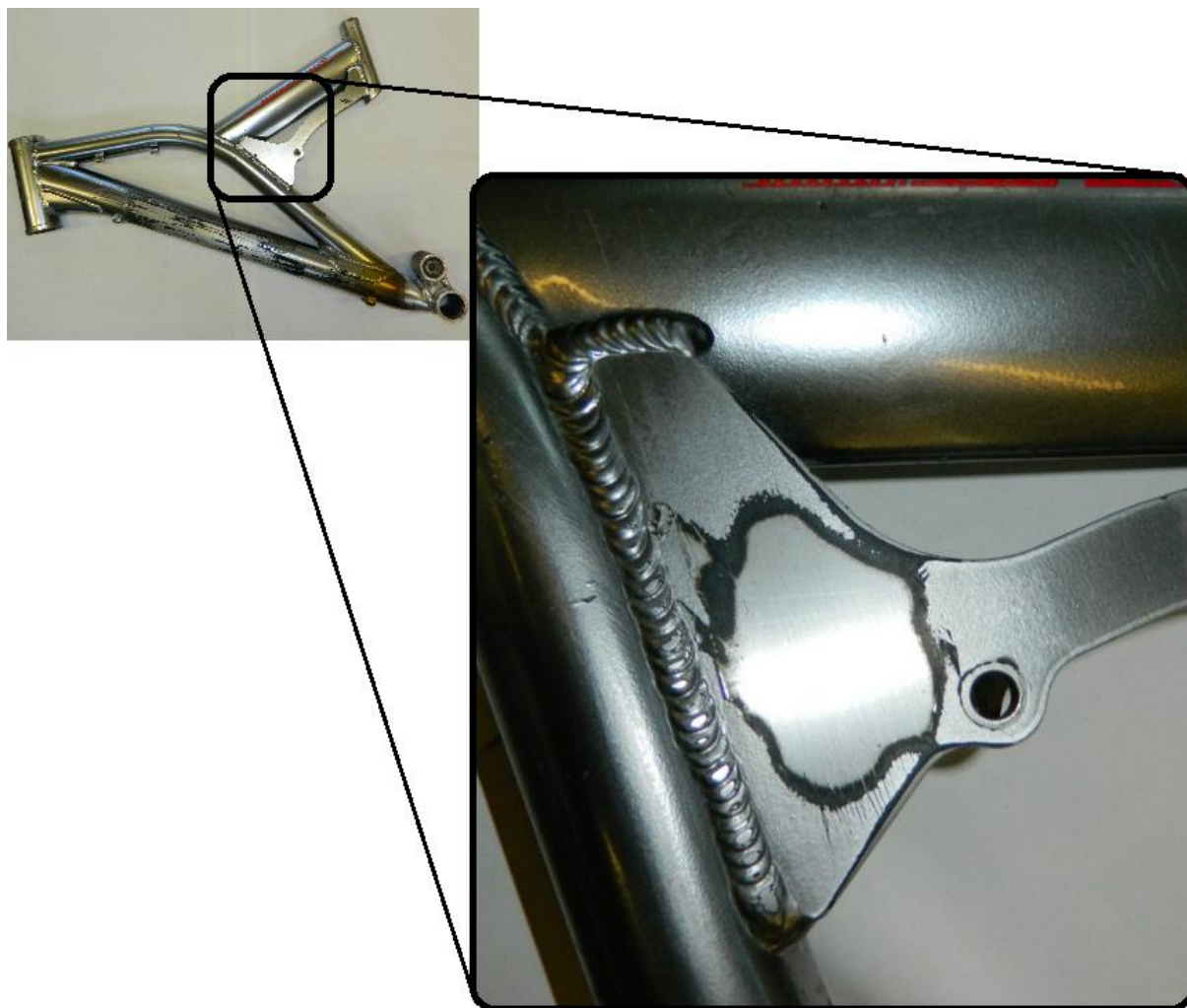
Slika 17. Donirani okvir bicikla (prednji trokut)



Slika 18. Pukotina na rubu zavora

6.2. Ispitivanje vrste materijala okvira

Na većini okvira bicikala proizvođač navodi vrstu legure od koje je okvir napravljen. Na doniranom okviru legura nije bila navedena. Stoga je u Laboratoriju za zaštitu materijala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu provedena kvantitativna kemijska analiza doniranog okvira. Prije ispitivanja bilo je potrebno ukloniti boju s okvira i fino izbrusiti mali dio ravne površine na okviru (slika 19). Boja je uklonjena skalpelom, a brušenje je izvršeno ručno s brusnim papirima; prvo grubljim brusim papirom P150, zatim fino brušenje brusnim papirima P320 i P500. Nakon brušenja površina je prebrisana alkoholom kako bi se uklonile masnoće i komadići brusnog papira. Tek tada okvir je bio spreman za ispitivanje. Maseni udio kemijskih elemenata određen je nerazornom metodom rendgenske fluorescentne spektrometrijske analize (*engl.* X-ray Fluorescence analysis - XRF analysis) pomoću ručnog uređaja Olympus XRF (slika 20), proizvođača Innov-X Systems Inc., SAD, model: DS 2000-C, serijski broj: 50149. Tablica 8. prikazuje izmjerene vrijednosti masenog udjela kemijskih elemenata. Izmjereni maseni udjeli odgovaraju sastavu legure EN AW-7005.



Slika 19. Priprema površine za kvantitativnu kemijsku analizu aluminijske legure iz koje je okvir izrađen



Slika 20. Određivanje masenog udjela kemijskih elemenata ručnim uređajem Olympus XRF

Tablica 8. Izmjereni maseni udjeli kemijskih elemenata okvira

ELEMENT	%	+/-
Mg	0,87	0,41
Al	93,90	0,29
Cr	0,05	0,01
Mn	0,27	0,02
Fe	0,15	0,01
Cu	0,014	0,003
Zn	4,47	0,03
Zr	0,141	0,002
W	0,14	0,02

6.3. Ispitivanje zavora penetrantima prije zavarivanja

Prije početka ispitivanja potrebno je očistiti zavar mehanički (slika 21). Mehaničko čišćenje napravljeno je čeličnom ručnom četkom. Oprema za ispitivanje penetrantima sastoji se od "čistača", "penetranta" i "razvijača" njemačkog proizvođača TIEDE (slika 22). Postupak ispitivanja je; na površinu se nanosi "čistač" oznake RL-40. Čistač je poseban sprej u boci kojim se poprska površina zavora, služi za kemijsko čišćenje površine. Zatim se površina na koji je čistač nanesen obriše čistom krpom, te se na površinu nanosi penetrant (slika 23) oznake PWL-1 kojeg je prema preporukama proizvođača potrebno ostaviti da djeluje između 5 i 60 minuta. Nakon 20 minuta, penetrant je uklonjen s površine zavora vodom iz vodovoda (slika 24). Zatim je površina dobro osušena od vode te je na nju nanesen "razvijač" oznake DL-20. Potrebno je pričekati između 10 i 30 minuta kako bi se razvijač "izvukao" penetrant iz pukotina. Nakon toga slijedi vizualna inspekcija te se jasno može vidjeti pukotina duž ruba zavora (slika 25).



Slika 21. Mehanički očišćen zavar prije ispitivanja penetrantima



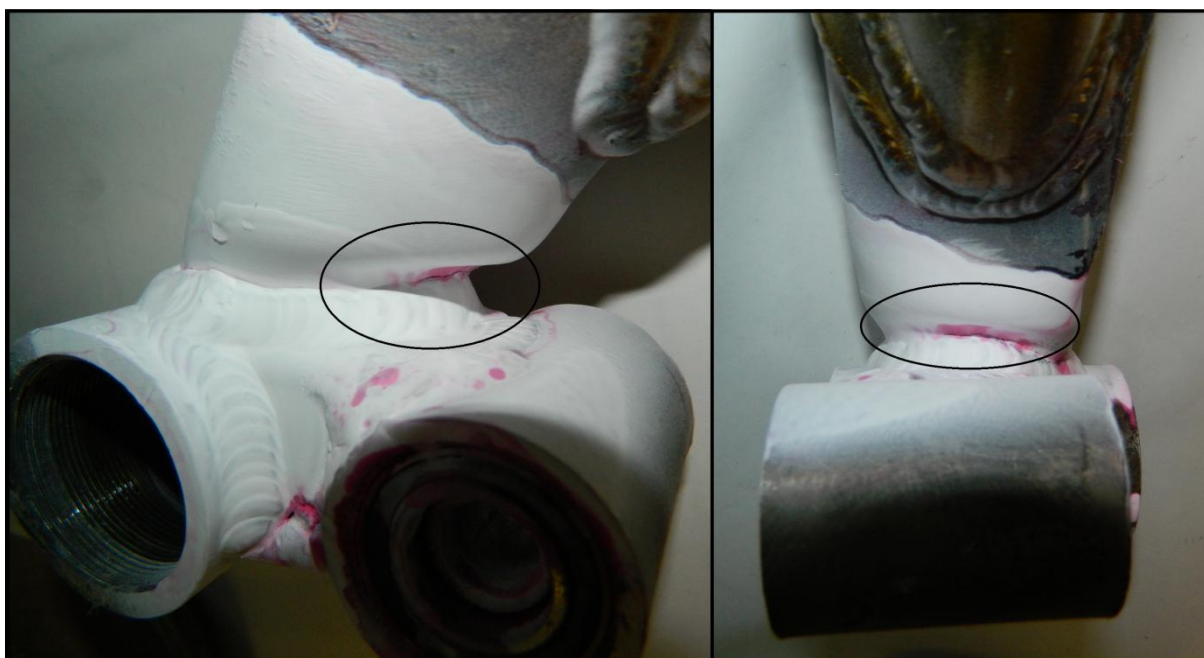
Slika 22. Oprema za ispitivanje penetrantom



Slika 23. Penetrant nanesen na površinu zavara



Slika 24. Zavar nakon što je vodom ispran penetrant



Slika 25. Indikacija pukotine

6.4. Reparatura pukotine

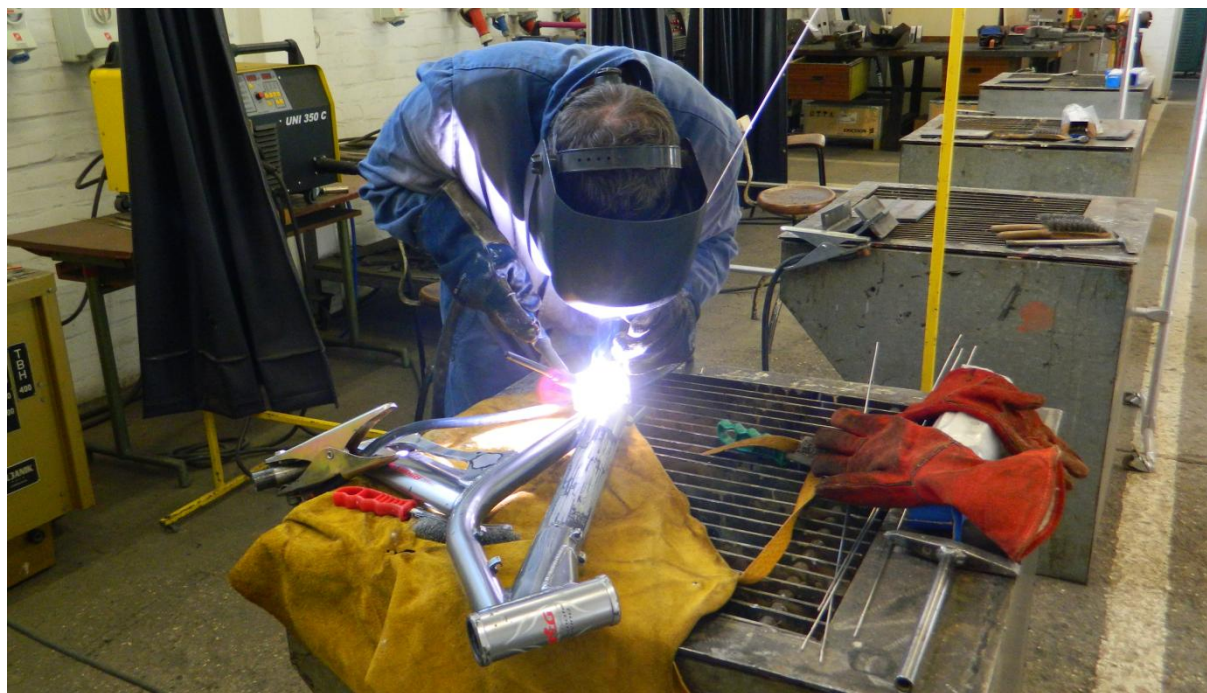
Reparatura pukotine izvedena je TIG postupkom zavarivanja. Model stroja za zavarivanje je KJELLBERG TINY 170 AC/DC (slika 26). Slika 27 prikazuje zavarivača tijekom zavarivanja okvira. Prije zavarivanja mjesto reparature očišćeno je mehanički čeličnom ručnom četkom, te alkoholom. S obzirom na to da je legura okvira EN AW-7005, odabrana je šipka dodatnog materijala ER 5356 prema tablici 4. Proizvođač šipke dodatnog materijala je Elektroda Zagreb, karakteristike dodatnog materijala prikazane su na slici 28. Parametri zavarivanja prikazani su u tablici 9. Volframova elektroda korištena za zavarivanje je zelene boje, što označava da se radi o 100% volframovoj elektrodi, koja služi za zavarivanje aluminija i legura lakih materijala izmjeničnom strujom. Reparatura pukotine izvršena je jednim prolazom preko cijele pukotine.

Tablica 9. Parametri zavarivanja

Parametar	Vrijednost, mjerna jedinica
Vrsta zaštitnog plina	100% Ar
Protok zaštitnog plina	7,5 l/min
Jačina struje	126 A
Promjer elektrode	2,4 mm
Vrsta struje	AC (izmjenična struja)



Slika 26. Aparat za zavarivanje KJELLBERG TINY 170 AC/DC



Slika 27. Zavarivač tijekom zavarivanja

EZ - TIG AlMg5

NORME

HRN EN ISO 18723	AWS / ASME SFA-5.10	W. Nr.
S Al 5356 / Al Mg5Cr(A)	ER5356	3.3556

SVOJSTVA I PODRUČJE PRIMJENE

Aluminijska šipka za TIG zavarivanje legirana s 5% magnezija. Namijenjena za zavarivanje Al-Mg i Al-Mg-Si legura. Metal zavora relativno visoke čvrstoće, korozijski postojan u morskoj atmosferi. Pogodna za zavarivanje dijelova namijenjenih eloksiraju.

MEHANIČKA SVOJSTVA ČISTOG METALA ZAVARA

$R_{p0.2}$ N/mm ²	R_m N/mm ²	A_5 %
120	260	> 25

ORIJENTACIJSKI KEMIJSKI SASTAV ŠIPKE

	Al	Mg	Mn	Cr	Si	Fe
%	bal.	5,0	0,15	0,10	0,05	0,15

ZAŠTITNI PLIN

I1 (Ar)

PAKIRANJE

Promjer šipke mm	Duljina šipke mm	Težina pakiranja kg
1,2; 1,6; 2,0; 2,4; 3,2; 4,0	1000	5



Oznaka: 3.3556 / 5356

Slika 28. Svojstva i kemijski sastav šipke dodatnog materijala ER 5356 [28]

6.5. Ispitivanje zavora penetrantima nakon zavarivanja

Nakon zavarivanja okvir je ostavljen da se ohladi na okolišnoj temperaturi prije ponovnog ispitivanja penetrantima. Slike 29 i 30 prikazuju izgled zavora nakon reparature. Ponovljen je identičan postupak ispitivanja penetrantima; nanošenje čistača, zatim penetranta (slika 31) s vremenom držanja od 20 minuta, ispiranje vodovodnom vodom, sušenje te nanošenje razvijaa i čekanje 20 minuta kako bi se pojavila indikacija pukotine (slika 32).



Slika 29. Izgled zavora nakon reparature (pogled s lijeva)



Slika 30. Izgled zavora nakon reparature (pogled s desna)



Slika 31. Nanošenje penetranta na zavar nakon reparature



Slika 32. Indikacija pukotine nakon nanošenja razvijачa

Na slici 32 vidimo da više nema indikacija pukotine na mjestu gdje je izvedena reparatura, osim jedne točkice, za koju je zaključeno da je nastala od nečistoće, te nije na mjestu gdje je reparatura izvedena. Na slici 33 vidljiva je pora u završnom krateru reparaturnog zavora. Nakon zavarivanja, u zoni utjecaja topline došlo je do degradacije mehaničkih svojstava, te je okvir potrebno podvrgnuti ponovnoj toplinskoj obradi, u ovom slučaju to nije učinjeno zbog nedostatka mogućnosti da se cijeli okvir umetne u peć za toplinsku obradu.



Slika 33. Indikacija pukotine u završnom krateru reparaturnog zavora

7. ZAKLJUČAK

Analizom podataka dostupnih na internetu, iskustava biciklista, te osobnog iskustva, aluminijski okviri bicikala podložni su nastanku pukotina u zoni utjecaja topline tijekom eksploatacije. Najčešće mjesto nastanka pukotine je u zoni utjecaja topline zavaru koji spaja donju cijev i prednju cijev na prednjem trokutu okvira. U eksperimentalnom dijelu ovog rada prikazan je postupak reparature aluminijskog okvira. Dakle, za izvedbu kvalitetne reparature potrebno je odrediti vrstu legure od koje je okvir napravljen i pripremiti površinu za zavarivanje mehaničkim i kemijskim čišćenjem kako bi se uklonile masnoće i ostale nečistoće koje mogu kontaminirati zavar. Nakon toga potrebno je pravilno odabrati dodatni materijal iz norme koja propisuje dodatne materijale za zavarivanje aluminija, u ovom radu dodatni materijal je odabran prema američkoj normi AWS A5.10/A5.10M:1999. Zatim, ako se radi o pukotini, potrebno je provjeriti točno mjesto i dužinu pukotine, a to se može učiniti ispitivanjem penetrantima, kao što je učinjeno u eksperimentalnom dijelu, no takvo ispitivanje nije potrebno ako se radi o većoj pukotini, odnosno dva odvojena dijela okvira koje je potrebno ponovno spojiti. Zaključak je da se puknuća aluminijskih okvira za bicikle mogu reparirati, no kao što je detaljno objašnjeno u poglavlju 3.6.4. okvir je nakon zavarivanja potrebno podvrgnuti naknadnoj toplinskoj obradi kako bi se povratila neka od mehaničkih svojstava. Ako garancija na okvir još vrijedi, napukli ili oštećeni okvir moguće je zamijeniti za novi preko garancije, ako oštećenje odgovara uvjetima garancije. Reparatura dolazi kao opcija nakon isteka garancije, ili ako proizvođač ne priznaje oštećenje pod garanciju, tj. ako smatra da je oštećenje nastalo uslijed neodgovarajuće upotrebe okvira. Neki proizvođači nude mogućnost reparature uz naknadnu toplinsku obradu, što nije najjeftinija opcija, ali je najkvalitetnija ako se želi popraviti okvir. Većina biciklista se odlučuje za reparaturu u lokalnoj zavarivačkoj radionici, prije svega zato što je tako najbrže i najjeftinije, ali tada nema naknadne toplinske obrade, te postoji visoka mogućnost ponovnog pucanja zavaru, ovisno o tome kako i gdje se bicikl vozi. Ako se radi o gradskom biciklu koji se vozi uglavnom po asfaltu gdje okvir neće trpjeti jake udarce kao npr. po neasfaltiranim cestama, reparatura aluminijskog okvira bez naknadne toplinske obrade je prihvatljiva opcija.

LITERATURA

- [1] Gene Mathers, «*The welding of aluminium and its alloys*», Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2002.
- [2] <http://sam.davyson.com/as/physics/aluminium/siteus/uses.html>, 10.1.2015.
- [3] http://aluminium.matter.org.uk/aluselect/03_physical_browse.asp, 16.1.2015.
- [4] http://aluminium.matter.org.uk/aluselect/09_mech_browse.asp, 16.1.2015.
- [5] https://www.fsb.unizg.hr/atlantiss/upload/newsboard/02_05_2011__14837_2011-05-08-MAG_rad-v102.pdf, 10.1.2015.
- [6] BS EN 573-3:2009, Aluminium and aluminium alloys - Chemical composition and form of wrought products - Part 3: Chemical composition and form of products
- [7] <http://www.alueurope.eu/wp-content/uploads/2012/01/AAM-Materials-3-Designation-system.pdf>, 11.1.2015.
- [8] Ivan Juraga, Milan Živčić, Marin Gracin, «*Reparaturno zavarivanje*», vlastita naklada, 1994.
- [9] DIN EN ISO 4063:2000, Welding and allied processes - Nomenclature of processes and reference numbers
- [10] ISO 14175:2008, Welding consumables - Gases and gas mixtures for fusion welding and allied processes
- [11] AWS A5.10/A5.10M:1999, Specification for Bare Aluminum and Aluminum-Alloy Welding Electrodes and Rods
- [12] <http://www.lincolnelectric.com/en-us/support/welding-how-to/Pages/aluminum-design-mistakes-detail.aspx>, 15.1.2015.
- [13] Susanna & Herman Mills, «*Brdski biciklizam*», Znanje d.d, 2002.
- [14] http://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-042612-124752/unrestricted/Material_and_Design_Optimization_for_an_Aluminum_Bike_Frame.pdf, 18.1.2015.
- [15] http://media.cannondale.com/media/Manuals/2003_certain_gemini_frame_2002_2003_recall_en.pdf, 24.1.2015
- [16] <http://www.cpsc.gov/en/recalls/2010/niner-bikes-recalls-bicycle-frame-due-to-crash-hazard/>, 24.1.2015
- [17] <http://www.cpsc.gov/en/Recalls/2014/Felt-Bicycles-Recalls-Triathlon-Bicycles/#remedy>, 24.1.2015
- [18] <http://www.norco.com/havoc-recall/>, 24.1.2015
- [19] <http://www.cpsc.gov/en/recalls/2011/giant-recalls-anthem-x-29er-bicycles-due-to-fall-hazard/>, 24.1.2015

- [20] <http://www.exploratorium.edu/cycling/frames4.html>, 20.1.2015
- [21]
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/0e/Bicycle_frame_mtb_hardtail.jpg/1280px-Bicycle_frame_mtb_hardtail.jpg, 25.1.2015.
- [22] http://i969.photobucket.com/albums/ae171/david-simone/IMG_3538.jpg, 25.1.2015.
- [23] <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=89&pageid=2144417035>, 23.1.2015.
- [24] <http://www.bike-advisor.com/bicycle-guides/aluminum-frames-6061-vs-7005-which-is-the-best.html>, 10.1.2015.
- [25] http://www2.galcit.caltech.edu/~tongc/html/data/elastic/Extruded_Alloy_6061.pdf, 11.1.2015.
- [26] <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA6061t6>, 19.1.2015.
- [27]
<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=34c308934f7a4be589a80ecbee94406e>, 15.1.2015.
- [28] <http://www.elektroda-zagreb.hr/download/product/089%20EZ%20-%20TIG%20AlMg5.pdf>, 12.2.2015.